

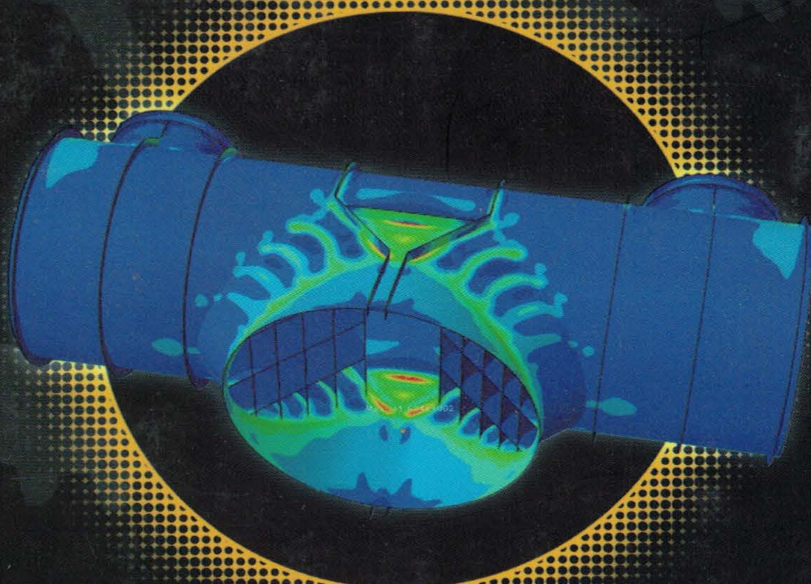
CAD/CAM/CAE工程应用丛书

ABAQUS 6.12 有限元分析从入门到精通

CAE应用联盟 组编　张建伟 等编著

本书核心内容包含

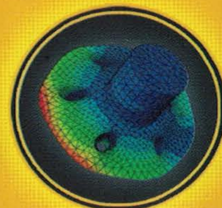
- ABAQUS操作入门
- 建立模型
- 相互作用
- 载荷与边界条件
- 网格划分
- 后处理与数据可视化
- 线性静态分析
- 非线性分析
- 动力学分析
- 接触问题分析
- 显式动态分析
- 热分析
- 加工仿真分析





附赠全书范例素材 DVD 光盘







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



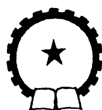
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书·ANSYS 系列

ABAQUS 6.12 有限元分析从入门到精通

CAE 应用联盟　组　编
张建伟　等编著



机械工业出版社

本书以 ABAQUS 6.12 版为软件平台，介绍了 ABAQUS 的操作命令及其在工程结构数值分析中的使用方法和技巧。

本书分基础应用篇和实际工程篇两个层次讲解，共 16 章。基础应用篇（第 1～9 章）包括有限单元法的基础理论、ABAQUS 入门知识介绍，几何建模技术与技巧、分析步的概念与设置方法、相互作用的概念与使用、载荷与边界条件的定义、网格的划分、作业的创建与设置以及可视化后处理技术；实际工程篇（第 10～16 章）依托工程中常见的实例，按照不同的分析方式，分层次、分类别地进行了详尽的操作演示与方法教学。本书根据实际应用为读者提供的专题包括结构静力学分析、显式与隐式的动力学分析、线性与非线性的静力与动力学分析、接触分析、热结构耦合问题分析、加工过程仿真等，具有一定的参考价值。

本书工程背景深厚，内容丰富，讲解详尽，内容安排由浅入深，适用于不同层次的 ABAQUS 用户，既可作为大、中专院校相关专业高年级本科生、研究生的参考用书，也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

ABAQUS 6.12 有限元分析从入门到精通 / CAE 应用联盟组编；张建伟等编著.
—北京：机械工业出版社，2014.9 (2015.8重印)
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-48652-7

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①C… ②张… Ⅲ. ①有限元分析–应用软件
Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 274234 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任校对：张艳霞
责任编辑：张淑谦
责任印制：乔　宇

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2015 年8 月第 1 版 • 第2 次印刷
184mm×260mm • 31.5 印张 • 780 千字
3001－5000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-48652-7
　　　　　ISBN 978-7-89450-600-9（光盘）
定价：86.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：（010）88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：（010）68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
（010）88379203	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com



出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　言

ABAQUS 融结构、热力学、流体、电磁、声学和爆破分析于一体，具有强大的前后处理及计算分析能力，能够同时模拟结构、热、流体、电磁以及多种物理场间的耦合效应。

本书以 ABAQUS 6.12 版为软件平台，依托大量的工程实例，具体讲解运用 ABAQUS 高级有限元分析软件处理工程问题的方法与详细步骤。本书的目的是使读者系统地掌握 ABAQUS 的使用方法，能够对各种工程结构进行规划、建模、加载求解与结果处理，并编写相应的 INP 文件（输入文件）。

1．本书特点

由浅入深，循序渐进：本书以初、中级读者为对象，首先从 ABAQUS 使用基础讲起，再辅以 ABAQUS 在工程中的应用案例帮助读者尽快掌握使用 ABAQUS 进行有限元分析的技能。

步骤详尽、内容新颖：本书结合作者多年 ABAQUS 使用经验与实际工程应用案例，将 ABAQUS 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

实例典型，轻松易学：学习实际工程应用案例的具体操作是掌握 ABAQUS 的最好方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ABAQUS 在各领域应用的方法和技巧。

2．本书内容

本书分基础应用篇和实际工程篇两个层次进行讲解。

基础应用篇（第 1～9 章）包括有限单元法的基础理论、ABAQUS 入门知识，几何建模技术与技巧、分析步的概念与设置方法、相互作用的概念与使用、载荷与边界条件的定义、网格的划分、作业的创建与设置以及可视化后处理技术。章节设置如下。

第 1 章　有限单元法分析概述　　第 2 章　ABAQUS 操作入门
第 3 章　建立模型　　第 4 章　分析步
第 5 章　相互作用　　第 6 章　载荷与边界条件
第 7 章　网格划分　　第 8 章　作业
第 9 章　后处理与数据可视化

实际工程篇（第 10～16 章）依托工程中常见的实例，按照不同的分析方式，分层次、分类别地进行了详尽的操作演示与方法教学。本书选取相关领域内的最具代表性工程问题为实例进行建模及加载求解，并以工程中的常用技术控制指标为依据进行后处理分析。章节设置如下。

第 10 章　线性静态分析　　第 11 章　非线性分析
第 12 章　动力学分析　　第 13 章　接触问题分析
第 14 章　显式动态分析　　第 15 章　热分析
第 16 章　加工仿真应用

本书专题实例中的每个例子都包含了图形界面操作和 INP 文件（输入文件）两种方式，两种方式在效果上完全等价。其中，图形界面方式通俗易懂且分析步骤一目了然；而 INP 文件（输入文件）方式则方便快捷，适合复杂问题的分析，而且可以控制在图形界面中无法进行的高级操作。读者应同时掌握两种分析方式，根据不同的具体问题，采用相对更加方便的方式。

提示：本书光盘配备了书中所有案例用到的素材源文件以及 INP 文件，以方便读者学习使用。

3．读者对象

本书既适合于 ABAQUS 的初、中级读者学习使用，也可供工程技术人员参考使用，具体读者对象如下。

★相关从业人员
★初学 ABAQUS 的技术人员
★大中专院校的教师和在校生
★相关培训机构的教师和学员
★参加工作实习的“菜鸟”
★ ABAQUS 爱好者
★广大科研工作人员
★初、中级 ABAQUS 从业人员

4．读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者朋友在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，作者会尽快给予解答。

5．本书作者

本书主要由张建伟编著，另外，参与编写的还有：丁金滨、唐家鹏、高飞、温正、石良臣、陈艳霞、林金宝、刘浩、凌桂龙、王芳、陈培见、刘成柱、宋玉旺、张岩、韩希强、丁凯、张亮亮、孙国强、于苍海、郭海霞、沈再阳、李昕、张文电、陈峰浩、王菁和李成芬。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

作　者

目　　录

出版说明
前言
第 1 章　有限单元法分析概述 …… 1
1.1　有限单元法基础理论 …… 1
1.1.1　有限元法的诞生和发展 …… 1
1.1.2　有限元法的基本思想 …… 2
1.2　ABAQUS 简介 …… 3
1.3　ABAQUS 文件系统 …… 5
1.4　本章小结 …… 6
第 2 章　ABAQUS 操作入门 …… 7
2.1　ABAQUS 用户界面 …… 7
2.2　ABAQUS 相关约定 …… 8
2.2.1　ABAQUS 中的单位制 …… 8
2.2.2　ABAQUS 中的坐标系 …… 10
2.2.3　ABAQUS 中的自由度 …… 11
2.3　ABAQUS 分析流程 …… 12
2.4　本章小结 …… 20
第 3 章　建立模型 …… 22
3.1　部件与草图（Part& Sketch） …… 22
3.1.1　部件模块简介 …… 22
3.1.2　建模实例——灭火器启动开关 …… 24
3.2　属性（Property） …… 29
3.2.1　属性模块简介 …… 29
3.2.2　创建材料 …… 31
3.2.3　创建与指派截面 …… 32
3.3　装配（Assembly） …… 36
3.3.1　导入部件 …… 36
3.3.2　装配实例——发动机连杆组件 …… 38
3.4　本章小结 …… 44
第 4 章　分析步 …… 45
4.1　分析步 …… 45
4.1.1　准备模型 …… 45
4.1.2　通用静力学分析步 …… 47
4.1.3　通用隐式动力学分析步 …… 50
4.1.4　通用显式动力学分析步 …… 51
4.1.5　线性摄动分析步 …… 52
4.2　输出设置 …… 54
4.2.1　输出请求管理器 …… 54
4.2.2　编辑输出请求 …… 54
4.3　分析步模块的其他功能 …… 55
4.3.1　ALE 自适应网格 …… 55
4.3.2　求解控制 …… 56
4.4　本章小结 …… 56
第 5 章　相互作用 …… 57
5.1　相互作用 …… 57
5.1.1　接触属性 …… 57
5.1.2　定义接触 …… 61
5.2　约束（Constraint） …… 68
5.2.1　绑定（Tie）约束 …… 68
5.2.2　刚体（Rigid body）约束 …… 70
5.2.3　显示体（Display body）约束 …… 71
5.2.4　耦合（Coupling）约束 …… 72
5.3　连接器（Connector） …… 73
5.3.1　连接器的截面特性 …… 74
5.3.2　连接器的特征线 …… 77
5.3.3　连接单元 …… 78
5.4　本章小结 …… 79
第 6 章　载荷与边界条件 …… 80
6.1　载荷（Load） …… 80
6.1.1　定义载荷 …… 80
6.1.2　集中力 …… 81
6.1.3　弯矩 …… 82
6.1.4　压强 …… 82
6.2　边界条件（Boundary Condition） …… 83
6.2.1　创建边界条件 …… 84
6.2.2　编辑对称/反对称/完全固定边界条件 …… 84

6.2.3 编辑位移/旋转边界条件 …… 85
6.3 本章小结 …… 86
第 7 章 网格划分 …… 87
7.1 种子（SEED） …… 87
7.1.1 为部件实例布种 …… 87
7.1.2 为边布种 …… 88
7.2 网格控制 …… 89
7.2.1 网格形状 …… 89
7.2.2 网格划分技术与算法 …… 90
7.2.3 网格控制注意事项 …… 94
7.3 单元族 …… 94
7.3.1 单元的表征 …… 95
7.3.2 实体单元 …… 97
7.3.3 壳单元 …… 105
7.3.4 梁单元 …… 112
7.3.5 桁架单元 …… 119
7.4 网格划分 …… 120
7.4.1 选择单元类型 …… 120
7.4.2 划分网格 …… 122
7.5 网格划分进阶技巧 …… 123
7.5.1 网格检查 …… 123
7.5.2 高质量的网格 …… 125
7.6 本章小结 …… 132
第 8 章 作业 …… 133
8.1 作业模块 …… 133
8.1.1 各功能模块调用逻辑 …… 133
8.1.2 创建作业 …… 134
8.1.3 管理作业 …… 137
8.2 网格自适应过程 …… 139
8.3 本章小结 …… 141
第 9 章 后处理与数据可视化 …… 142
9.1 在模型上显示结果 …… 142
9.1.1 变形图 …… 142
9.1.2 云图 …… 143
9.1.3 符号变量 …… 148
9.2 图表输出 …… 149
9.2.1 历程变量 XY 数据输出 …… 150
9.2.2 场变量 XY 数据输出 …… 151
9.2.3 关于路径的 XY 变量输出 …… 155
9.3 制作动画 …… 157
9.4 本章小结 …… 161
第 10 章 线性静态分析 …… 162
10.1 线性静力学分析概述 …… 162
10.1.1 静力学分析的基本概念 …… 162
10.1.2 结构静力学分析的方法 …… 162
10.2 线性静力学分析——滑动轴承 …… 163
10.2.1 问题描述 …… 163
10.2.2 分析过程 …… 163
10.3 初识 INP 文件 …… 185
10.3.1 INP 文件概述 …… 185
10.3.2 INP 文件实例讲解 …… 186
10.4 本章小结 …… 205
第 11 章 非线性分析 …… 206
11.1 非线性问题概述 …… 206
11.1.1 线性与非线性 …… 206
11.1.2 非线性的来源 …… 207
11.1.3 非线性问题求解方法 …… 210
11.2 非线性问题实例 …… 214
11.2.1 几何非线性问题——薄板的大变形 …… 214
11.2.2 材料非线性问题——橡胶的超弹性 …… 228
11.3 本章小结 …… 242
第 12 章 动力学分析 …… 243
12.1 动力学分析的理论基础 …… 243
12.1.1 固有频率和模态 …… 243
12.1.2 振型叠加 …… 244
12.1.3 阻尼 …… 245
12.1.4 瞬态动力学 …… 247
12.2 动力学问题实例 …… 248
12.2.1 线性动力学问题实例——模态分析 …… 248
12.2.2 非线性动力学问题实例——冲击与侵彻 …… 263
12.3 本章小结 …… 284
第 13 章 接触问题分析 …… 285
13.1 接触问题概述 …… 285

13.1.1 接触面间的相互作用…………285
13.1.2 在 ABAQUS 中定义接触……287
13.1.3 接触算法…………291
13.1.4 接触工程分析的关键技术……292
13.2 接触问题实例…………294
13.2.1 接触问题基础实例——法兰的密封尺寸…………294
13.2.2 刚性接触问题实例——塑性加工过程仿真…………313
13.3 本章小结…………352
第 14 章 显式动态分析…………353
14.1 显式动态分析简介…………353
14.1.1 显式动态问题的产生及其形式…………353
14.1.2 显式动态分析的主要方法……354
14.1.3 隐式和显式的比较…………355
14.2 显式动态分析实例…………356
14.2.1 ABAQUS/Explicit 实例——手机跌落测试…………356
14.2.2 ABAQUS/Explicit 实例——弹丸侵蚀靶体的分析…………379
14.3 本章小结…………404
第 15 章 热分析…………405
15.1 热力学基础知识…………405
15.1.1 符号与单位…………405
15.1.2 热分析相关基础知识…………406
15.2 热分析实例…………407
15.2.1 ABAQUS 瞬态热分析——金属散热管的温度场研究……408
15.2.2 ABAQUS 热应力分析——刹车盘片的热效应…………418
15.3 本章小结…………438
第 16 章 加工仿真应用…………439
16.1 机械加工仿真概述…………439
16.1.1 机械加工问题的特征…………439
16.1.2 计算成本优化…………440
16.2 机械加工仿真实例…………446
16.2.1 ABAQUS 仿真实例——旋压加工…………446
16.2.2 ABAQUS 仿真实例——铆接…………471
16.3 本章小结…………492
参考文献…………494

第 1 章　有限单元法分析概述



有限元法（Finite Element Analysis，FEA）的基本概念是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。它将求解域看成是由许多称为有限元的小的互连子域组成的，对每一单元假定一个合适的（较简单的）近似解，然后推导求解这个域总的满足条件（如结构的平衡条件），从而得到问题的解。

这个解不是准确解，而是近似解，因为实际问题被较简单的问题所代替。由于大多数实际问题难以得到准确解，而有限元不仅计算精度高，而且能适应各种复杂形状，因而成为行之有效的工程分析手段。本章所介绍的内容是进一步学习 ABAQUS 分析的最基础内容。对 ABAQUS 或者有限元方法，都应从最基础的内容入手，才能加深后续知识的理解。

学习目标

- 了解有限元法的基本思想及发展
- 了解 ABAQUS 的文件系统
- 掌握 ABAQUS 界面组成及基本功能
- 了解 ABAQUS 6.12 的新特性

1.1　有限单元法基础理论

随着现代科学技术的发展，人们正在不断建造更为快速的交通工具、更大规模的建筑物、更大跨度的桥梁、更大功率的发电机组和更为精密的机械设备。这一切都要求工程师在设计阶段就能精确地预测出产品和工程的技术性能，需要对结构的静、动力强度以及温度场、流场、电磁场和渗流等技术参数进行分析计算。例如分析计算高层建筑和大跨度桥梁在地震时所受到的影响，看看是否会发生破坏性事故；分析计算核反应堆的温度场，确定传热和冷却系统是否合理；分析涡轮机叶片内的流体动力学参数，以提高其运转效率。如果把这些都归结为求解物理问题的控制偏微分方程式，往往是不可能的。

近年来在计算机技术和数值分析方法支持下发展起来的有限元分析方法则为解决这些复杂的工程分析计算问题提供了有效的途径。

1.1.1 有限元法的诞生和发展

有限元法是一种高效能、常用的计算方法。有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的，所以它广泛地应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中（这类场与泛函的极值问题有着紧密的联系）。

1969 年以来，某些学者在流体力学中应用加权余数法中的迦辽金法（Galerkin）或最小二乘法等同样获得了有限元方程，因而有限元法可应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中，而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

大约在 300 年前，牛顿和莱布尼茨发明了积分法，证明了该运算具有整体对局部的可加性。虽然，积分运算与有限元技术对定义域的划分是不同的（前者进行无限划分而后者进行有限划分）。但积分运算为实现有限元技术准备好了一个理论基础。之后著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的解法。这两项成果中，前者被用来将微分方程改写为积分表达式，后者被用来求解有限元法所得出的代数方程组。

在 18 世纪，另一位数学家拉格朗日提出了泛函分析。泛函分析是将偏微分方程改写为积分表达式的另一途经。

在 19 世纪末及 20 世纪初，数学家瑞雷和里兹首先提出可对全定义域运用展开函数来表达其上的未知函数。1915 年，数学家伽辽金提出了选择展开函数中形函数的伽辽金法，该方法被广泛地用于有限元。

1943 年，数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数。这实际上就是有限元的做法。实现有限元技术的第二个理论基础也已确立。

20 世纪 50 年代，飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组，首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析，经过一番波折后获得前述的两个离散的成功。同期，大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作，这为实现有限元技术准备好了物质条件。

1960 年前后，美国的克拉夫（R.W.Clough）教授及我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后，这样的叫法被大家接受，有限元技术从此正式诞生。

1.1.2 有限元法的基本思想

有限元方法与其他求解边值问题近似方法的根本区别在于：它的近似性仅限于相对小的子域中。20 世纪 60 年代初，首次提出结构力学计算有限元概念的克拉夫（Clough）教授形象地将其描绘为：“有限元法=Rayleigh Ritz 法＋分片函数”，即有限元法是 Rayleigh Ritz 法的一种局部化情况。

不同于求解（往往是困难的）满足整个定义域边界条件的允许函数的 Rayleigh Ritz 法，有限元法将函数定义在简单几何形状（如二维问题中的三角形或任意四边形）的单元域上（分片函数），且不考虑整个定义域的复杂边界条件，这是有限元法优于其他近似方法的原因之一。

有限元方法（FEM）的基础是变分原理和加权余量法，其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内，选择一些合适的结点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的结点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法，将微分方程离散求解。

采用不同的权函数和插值函数形式，便构成不同的有限元方法。有限元方法最早应用于结构力学，后来随着计算机的发展，它也慢慢用于流体力学的数值模拟。在有限元方法中，把计算域离散剖分为有限个互不重叠且相互连接的单元，在每个单元内选择基函数，用单元基函数的线形组合来逼近单元中的真解，整个计算域上总体的基函数可以看为是由每个单元基函数组成的，则整个计算域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成。

例如，在河道数值模拟中，常见的有限元计算方法是由变分法和加权余量法发展而来的

里兹法和伽辽金法、最小二乘法等。根据所采用的权函数和插值函数的不同，有限元方法也分为多种计算格式。从权函数的选择来说，有配置法、矩量法、最小二乘法和伽辽金法，从计算单元网格的形状来划分，有三角形网格、四边形网格和多边形网格，从插值函数的精度来划分，又分为线性插值函数和高次插值函数等。不同的组合同样构成不同的有限元计算格式。

对于权函数，伽辽金（Galerkin）法是将权函数取为逼近函数中的基函数；最小二乘法是令权函数等于余量本身，而内积的极小值则为对代求系数的平方误差最小；在配置法中，先在计算域内选取 N 个配置点。令近似解在选定的 N 个配置点上严格满足微分方程，即在配置点上令方程余量为 0。

插值函数一般由不同次幂的多项式组成，最常用的是多项式插值函数，也有采用三角函数或指数函数组成的乘积表示。

有限元插值函数分为两大类，一类只要求插值多项式本身在插值点取已知值，称为拉格朗日（Lagrange）多项式插值；另一种不仅要求插值多项式本身，还要求它的导数值在插值点取已知值，称为哈密特（Hermite）多项式插值。

单元坐标有笛卡儿直角坐标系和无因次自然坐标，有对称和不对称等。常采用的无因次坐标是一种局部坐标系，它的定义取决于单元的几何形状，一维看作长度比，二维看作面积比，三维看作体积比。

在二维有限元中，三角形单元应用的最早，近来四边形等参数单元的应用也越来越广。对于二维三角形和四边形单元，常采用的插值函数有拉格朗日插值直角坐标系中的线性插值函数及二阶或更高阶插值函数、面积坐标系中的线性插值函数以及二阶或更高阶插值函数等。

1.2 ABAQUS 简介

ABAQUS 最初由美国 HKS（Hibbitt，Karlsson & Sorensen）公司开发，2005 年被法国达索系统（DASSAULT SYSTEMES，达索工业集团旗下公司，在 1981 年由达索航空公司创立，是著名的三维 CAD 软件 CATIA 的开发者）收购，2007 年更名为 SIMULIA 公司。

ABAQUS 是一套功能强大的工程模拟有限元软件，其解决问题的范围从相对简单的线性分析到许多复杂的非线性问题。ABAQUS 包括一个丰富的、可模拟任意几何形状的单元库，并拥有各种类型的材料模型库，可以模拟典型工程材料的性能，其中包括金属、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋混凝土、可压缩超弹性泡沫材料以及土壤和岩石等地质材料。

作为通用的模拟工具，ABAQUS 除了能解决大量结构（应力—位移）问题，还可以模拟其他工程领域的许多问题，例如热传导、质量扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析（流体渗透—应力耦合分析）及压电介质分析等。

ABAQUS 为用户提供了广泛的功能，且使用起来又非常简单。大量的复杂问题可以通过选项块的不同组合很容易的模拟出来。

例如，对于复杂多构件问题的模拟是通过把定义每一构件的几何尺寸的选项块与相应的材料性质选项块结合起来的。在大部分模拟中（甚至高度非线性问题），用户只需提供一些工程数据即可，如结构的几何形状、材料性质、边界条件及载荷工况。

在一个非线性分析中，ABAQUS 能自动选择相应载荷增量和收敛限度。它不仅能够选择合适参数，而且能连续调节参数以保证在分析过程中有效地得到精确解。用户通过准确的定义参数就能很好的控制数值计算结果。

ABAQUS 有两个主求解器模块：ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。ABAQUS 还包含一个全面支持求解器的图形用户界面，即人机交互前后处理模块——ABAQUS/CAE。

ABAQUS/Standard 有 3 个特殊用途的分析模块：ABAQUS/Aqua、ABAQUS/Design 和 ABAQUS/Foundation。此外 ABAQUS 还为 MOLDFLOW 和 MSC.ADAMS 提供了相应接口。ABAQUS/CAE 是集成的工作环境，包含了 ABAQUS 的建模、交互式作业提交、监控运算过程及后处理等功能。ABAQUS 产品的结构与各模块关系如图 1-1 所示。

ABAQUS/CAE
作业监控
直接转换器
建立模型
可视化
第三方前处理器
ABAQUS/Standard
ABAQUS/Explicit
ABAQUS/Aqua
ABAQUS/Design
ABAQUS/Foundation
MOLDFLOW接口
ADAMS接口
MOLDFLOW
第三方后处理器
ADAMS/Flex

图 1-1　ABAQUS 模块

■ **ABAQUS/Standard**

ABAQUS/Standard 是通用分析模块，采用隐式解法，可以求解各种线性及非线性问题。ABAQUS/Standard 分析模块广泛应用于静力学、动力学、热响应及电响应等多领域问题的求解中。

■ **ABAQUS/Explicit**

ABAQUS/Explicit 是显式动力分析模块，采用显式解法，关于显式解法与隐式解法的不同及各自应用领域将在后文中详细讨论。ABAQUS/Explicit 分析模块适用于短暂、瞬时的动态事件，对接触条件发生改变的高度非线性问题也非常有效。

■ **ABAQUS/CAE**

ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的交互环境，可以在 ABAQUS/CAE 模块中高效地完成建立模型、定义模型载荷条件及边界条件、提交作业、监控运算过程等。ABAQUS/CAE 具有强大的网格划分功能，而且可以显示计算结果，进行后处理。

■ **ABAQUS/Viewer**

ABAQUS/Viewer 是 ABAQUS/CAE 的子模块，只具有可视化模块的后处理功能。

■ **ABAQUS/Aqua**

ABAQUS/Aqua 是可选模块，用于模拟近海结构，如海上钻井平台等，包括模拟波浪、风及浮力等影响的功能。

■ **ABAQUS/Design**

ABAQUS/Design 是可选模块，用于进行设计敏感度的计算。

■ **ABAQUS/Foundation**

ABAQUS/Foundation 可以更经济地使用 ABAQUS 的线性静力与动力分析功能，减少系统开销。

ABAQUS 被广泛地认为是功能最强的有限元软件之一，可以分析复杂的固体力学结构力学系统，特别是能够处理非常庞大、复杂的问题和模拟高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析，同时还可以做系统级的分析和研究。

ABAQUS 的系统级分析的特点相对于其他分析软件来说是独一无二的。由于 ABAQUS 优秀的分析能力和模拟复杂系统的可靠性，使得 ABAQUS 被各国的工业和研究中所广泛地采用。ABAQUS 产品在大量的高科技产品研究中都发挥着巨大的作用。

1.3　ABAQUS 文件系统

ABAQUS 运行过程中所涉及的文件种类繁多，有数据库文件、用于输入或输出的文本文件、日志文件、信息文件、状态文件、用于重启与结果转换的文件等。此外，还有临时文件，该文件在运行时自动产生，完成后自动删除。ABAQUS 文件系统各种类型文件的介绍请参阅表 1-1。

表 1-1　ABAQUS 的文件系统

文件类型	文件名及扩展名	说　明	备　注
数据库文件	模型数据库文件：cae 文件	在 ABAQUS/CAE 中直接打开，包含几何模型、网格、载荷等信息及分析任务等	
	输出数据库文件：odb 文件	可在 ABAQUS/CAE 直接打开，也可以输入到 CAE 文件中作为部件或模型，包含在分析步模块中定义的场变量和历史变量输出结果，可以由可视化模块打开	
输入文件	inp 文件	文本文件，可以在作业（Job）模块中提交任务时或单击分析作业管理器中的 Write Input 按钮在工作目录中生成。Inp 文件可以输入模型，也可以直接由 ABAQUS Command 直接运行，inp 文件输的模型只包含有限元模型而无几何模型	
	pes 文件	参数更改后重写的 inp 文件	
	par 文件	参数更改后重写的以参数形式运行的 inp 文件	
日志文件	log 文件	文本文件，运行 ABAQUS 的日志	
数据文件	dat 文件	文本文件，记录数据和参数检查、单元质量检查等信息，包含预处理 inp 文件产生的错误与警告信息。包含用户定义的 ABAQUS/Standard 输入数据，ABAQUS/Explicit 的结果不会写入其中	
信息文件	msg 文件	记录计算过程中的平衡迭代次数、参数设置、计算时间、错误与警告信息等	
	ipm 文件	启动 ABAQUS/CAE 分析时开始写入，记录从 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 到 ABAQUS/CAE 的过程日志	
	prt 文件	模型的部件与装配信息	重启动分析时需要
	pac 文件	模型信息，仅用于 ABAQUS/Explicit	重启动分析时需要

（续）

文 件 类 型	文件名及扩展名	说　　明	备　　注
状态文件	sta 文件	文本文件，包含分析过程信息	
	abq 文件	仅用于 ABAQUS/Explicit，记录分析、继续和恢复命令	重启动分析时需要
	stt 文件	运行数据检查时产生的文件	重启动分析时需要
	psr 文件	文本文件，参数化分析要求的输入结果	
	sel 文件	用于结果选择，仅用于 ABAQUS/Explicit	重启动分析时需要
模型文件	mdl 文件	ABAQUS/Standard 与 ABAQUS/Explicit 中运行数据检查产生的文件	重启动分析时需要
保存命令的文件	jnl 文件	文本文件，包含用于复制已存储的模型数据库的 ABAQUS/CAE 命令	
	rpy 文件	记录运行一次 ABAQUS/CAE 所运用的所有命令	
	rec 文件	包含用于恢复内存中模型数据库的 ABAQUS/CAE 命令	
重启动文件	res 文件	使用 STEP 功能模块进行定义	
脚本文件	psf 文件	用户定义参数化研究时需要创建的文件	
临时文件	ods 文件	记录场输出变量的临时运算结果，运行后自动删除	
	lck	用于阻止并发写入输出数据库，关闭输出数据库时自动删除	

1.4　本章小结

本章为读者介绍了有限分析方法的诞生、发展以及基础理论。在进行工程设计或科学研究时，精通软件（无论是本书所介绍的 ABAQUS，或者是其他的有限元分析软件）是十分重要的。但同时，用户也必须理解有限元方法。对于基础知识的深入理解，是解决任何问题的基础。

本章的意义在于抛砖引玉，充分强调对于有限元方法本身的理解的意义，使用户在进行软件的学习之前，不仅仅知道有某些软件是用于这种分析的，更重要是理解这一方法本身所蕴含的思想。

第 2 章　ABAQUS 操作入门

在详细地为用户讲解 ABAQUS 的强大功能之前，对 ABAQUS 程序进行一个概述性质的简介十分必要，这有助于读者了解程序的架构及运作思想。本章将对 ABAQUS 的一些基本概念进行介绍，读者通过本章的介绍将了解 ABAQUS 的基本理念、界面形式、ABAQUS 中一些特殊的约定及操作习惯以及一个完整 ABAQUS 分析的流程。

学习目标

- 掌握 ABAQUS 图形界面使用
- 掌握 ABAQUS 中的单位制
- 掌握 ABAQUS 中的坐标系统
- 掌握 ABAQUS 中的自由度的概念
- 掌握 ABAQUS 分析的基本思想与流程

2.1　ABAQUS 用户界面

在 Windows 操作系统下，在“开始”菜单中单击 ABAQUS/CAE，即可打开 ABAQUS 用户界面。ABAQUS 用户界面如图 2-1 所示。各功能区的介绍如下。

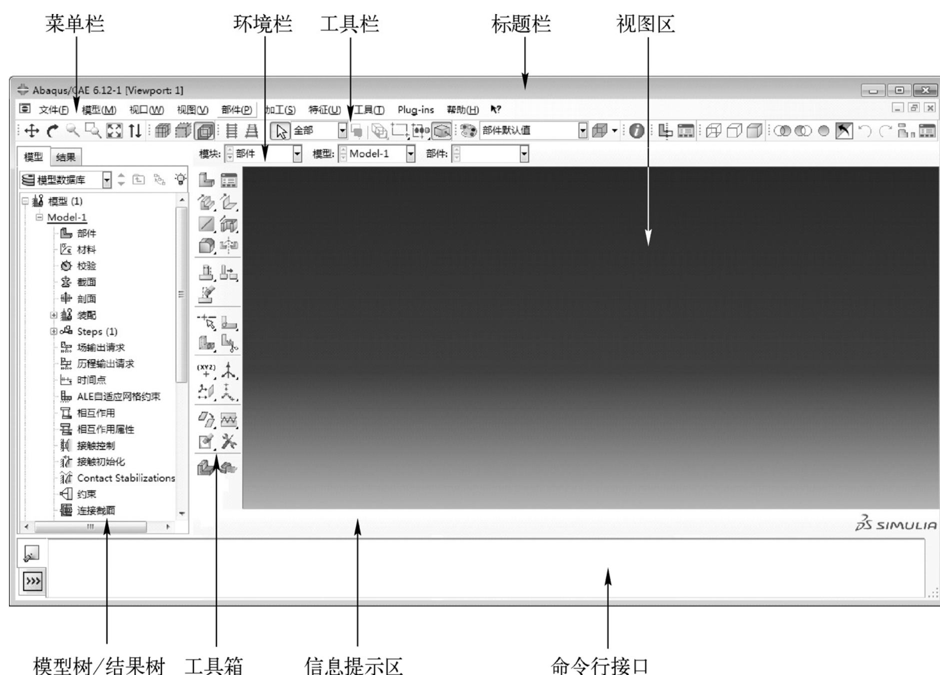


图 2-1　ABAQUS 用户界面

■ 标题栏

显示当前 ABAQUS 版本及模型数据库名称。

■ 菜单栏

包含了当前模块中的所有可用功能，与当前所选择的功能模块对应。

■ 工具栏

包含了菜单栏中的一些常用工具，方便调用。

■ 环境栏

环境栏中的模块列表用于切换功能模块，其他列表与当前选择的模块相对应，分别用于切换模型（Model）、部件（Part）、分析步（Step）、结果文件（ODB）和草图（Sketch）。

■ 模型树/结果树

早在 ABAQUS 6.6 版本开始，界面中就增加了结果树，可通过模型或结果选项卡进行切换。模型树中包含所有的模型与分析任务，分类列出所有功能模块及重要工具。

■ 工具箱

列出与当前模块相对应的功能按钮，方便用户调用。

■ 视图区

显示模型与结果。

■ 信息提示区

用户进行操作时，此提示区会进行相应提示，告诉用户如何进行下一步操作。

■ 命令行接口

通过按钮（命令行接口）与按钮（信息），可以切换此区域功能，用于输入命令行或显示状态信息。

2.2 ABAQUS 相关约定

在正式进入 ABAQUS 操作前，需要了解一些相关的约定。用户需要随时注意这些约定的影响，否则可能出现无法预知的也不易察觉的错误。

2.2.1 ABAQUS 中的单位制

与其他的有限元分析软件一样，ABAQUS 在运算过程中并不包含单位或量纲的概念。统一单位制是用户进行有限元分析之前必须要进行的一项工作。ABAQUS 常用的单位制如表 2-1 所示，表中所示的单位是需要用户自行将所需分析的数据或资料进行换算统一的，ABAQUS 不会对单位进行分辨。

表 2-1 ABAQUS 中的常用单位

量纲	SI	SI/mm	US/ft	US/inct
长度	m	mm	ft	in
载荷	N	N	lbf	lbf
质量	kg	10^3kg	slug	lbfs^2/in
时间	s	s	s	s

（续）

量纲	SI	SI/mm	US/ft	US/inct
应力	Pa/N • m^{-2}	Mpa/N • mm^{-2}	lbf/ft^2	psi/lbf • in^{-2}
能量	J	mJ/10^{-3}J	ft lbf	in lbf
密度	kg • m^{-3}	mm^3	slug/ft^3	lbf s^2/in^4

以下为用户提供几种常用的单位制及导出物理量的计算方式，方便读者查阅。

1．基本物理量及其量纲

- 长度 L。
- 质量 M。
- 时间 t。
- 温度 T。

导出物理量及其量纲如下。

- 速度：v=L/t。
- 加速度：$a=L/t^2$。
- 面积：$A=L^2$。
- 体积：$V=L^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3$。
- 力：$F=m\cdot a=m\cdot L/t^2$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$E=F\cdot L=m\cdot L^2/t^2$。
- 压力、应力、弹性模量等：$P=F/A=m/(t^2\cdot L)$。
- 热流量、功率等：$\psi=E/t=m\cdot L^2/t^3$。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)$。
- 比热容：$c=E/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)$。
- 热交换系数：$Cv=E/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)$。
- 粘性系数：$Kv=P\cdot t=m/(t\cdot L)$。
- 熵：$S=E/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= L^2/(t^2\cdot T)$。

确定了要选用的单位制，确定基本物理量后，即可以推导其余物理量。

2．mm-t-s-K 单位制基本物理量的单位

- 长度 L（mm）。
- 质量 M（t）。
- 时间 t（s）。
- 温度 T（K）。

则可以推导出各物理量单位如下。

- 速度：v=L/t（mm/s）。
- 加速度：$a=L/t^2$（mm/s^2）。
- 面积：$A=L^2$（mm^2）。
- 体积：$V=L^3$（mm^3）。

- 密度：$\rho=m/L^3$（t/mm^3）。
- 力：$F=m\cdot a=m\cdot L/t^2$（N）。
- 力矩、能量、热量、焓等：$E=F\cdot L=m\cdot L^2/t^2$（mJ）。
- 压力、应力、弹性模量等：$P=F/A=m/(t^2\cdot L)$（MPa）
- 热流量、功率等：$\psi=E/t=m\cdot L^2/t^3$（mW）。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)$（$kg\cdot m/(s^3\cdot K)$）。
- 比热容：$c=E/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)$（$mm^2/(s^2\cdot K)$）。
- 热交换系数：$Cv=E/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)$（$t/(s^3\cdot K)$）。
- 粘性系数：$Kv=P\cdot t=m/(t\cdot L)$（$t/(s\cdot mm)$）。
- 熵：$S=E/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)$（$10^{-3}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$）。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= L^2/(t^2\cdot T)$（$10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$）。

3．mm-kg-s-K 单位制常用物理量单位

- 速度：$v=L/t$（mm/s）。
- 加速度：$a=L/t^2$（mm/s^2）。
- 面积：$A=L^2$（mm^2）。
- 体积：$V=L^3$（mm^3）。
- 密度：$\rho=m/L^3$（kg/mm^3）。
- 力：$F=m\cdot a=m\cdot L/t^2$（mN）。
- 力矩、能量、热量、焓等：$E=F\cdot L=m\cdot L^2/t^2$（μJ）。
- 压力、应力、弹性模量等：$P=F/A=m/(t^2\cdot L)$（kPa）。
- 热流量、功率等：$\psi=E/t=m\cdot L^2/t^3$（μW）。
- 导热率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)$（$10^{-3}kg\cdot m/(s^3\cdot K)$）。
- 比热容：$c=E/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)$（$mm^2/(s^2\cdot K)$）。
- 热交换系数：$Cv=E/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)$（$kg/(s^3\cdot K)$）。
- 粘性系数：$Kv=P\cdot t=m/(t\cdot L)$（$kg/(s\cdot mm)$）。
- 熵：$S=E/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)$（$10^{-6}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$）。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= L^2/(t^2\cdot T)$（$10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$）。

注意：选择量纲时用户应考虑以下问题。

- 确定分析中使用的物理量的数量级，避免使数据出现过大或过小的情况。
- 同一个问题中所有物理量要保持一致，计算过程中尽量不要随意转换。

一般而言，先确定基本物理量再确定导出物理量。但实际情况下，用户也可以根据需要先确定导出物理量再反推基本物理量。

2.2.2 ABAQUS 中的坐标系

ABAQUS 的全局坐标系为笛卡儿坐标系，采用右手法则。用户可以自行定义局部坐标系以方便进行分析，进行结点、载荷、边界条件、线性约束方程、材料属性、耦合约束、连接器单元、ABAQUS/Standard 中接触分析的滑动方向定义及变量输出等操作。局部坐标系可以是笛卡儿坐标系，也可以是柱坐标、球坐标，均采用右手法则。

2.2.3 ABAQUS 中的自由度

如图 2-2 所示，ABAQUS 定义了 3 个平移自由度与 3 个旋转自由度。在 ABAQUS 中平移自由度和旋转自由度的正方向规定如下。

- 方向 1 的平移：U1。
- 方向 2 的平移：U2。
- 方向 3 的平移：U3。
- 绕轴 1 的旋转：UR1。
- 绕轴 2 的旋转：UR2。
- 绕轴 3 的旋转：UR3。

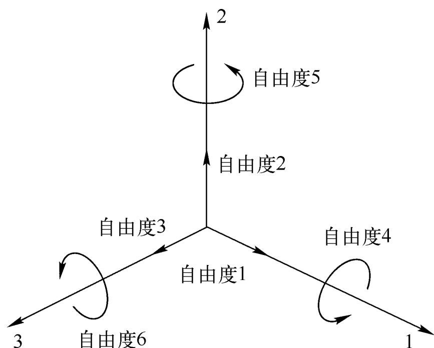


图 2-2　ABAQUS 自由度定义

ABAQUS 中的鼠标操作习惯如下。

熟悉三维 CAD 建模工具的用户会较快地习惯 ABAQUS 的鼠标操作习惯。如图 2-3 所示为一个常见的三键鼠标。

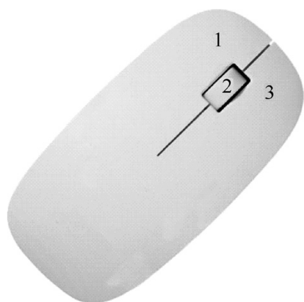


图 2-3　鼠标键

图 2-3 中所示的 1~3 号键分别为左键、中键、右键，习惯使用左手的用户可以将鼠标改为左手习惯，改为左手习惯后 1、3 号键功能交换。

用户可以选择“工具”菜单下的“选项”命令，弹出图 2-4 所示的“选项”对话框，定义习惯的视图操作，图 2-4 中定义的为 Pro/E 操作习惯，用户也可以定义为 CATIA、CAD 或 UG 等程序的操作习惯，如图 2-5 所示。



图 2-4　视图操作

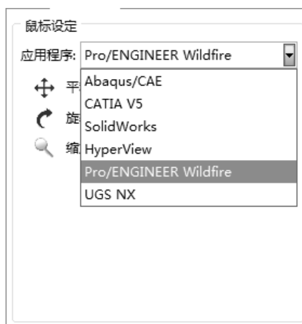


图 2-5　鼠标操作习惯

2.3　ABAQUS 分析流程

一个完整的 ABAQUS 分析流程应如图 2-6 所示。

接下来将以一个简单的实例——桁架结构的静力学分析为例，讲解 ABAQUS 分析的主要流程。本例采用 SI（mm）单位，模型如图 2-7 所示。

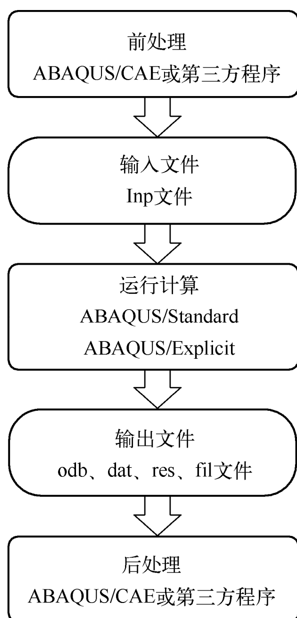


图 2-6　ABAQUS 分析流程

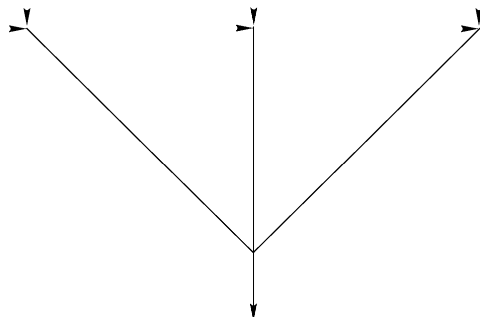


图 2-7　桁架

杆的截面积 2500mm^2，弹性模量为 2×10^5MPa，泊松比为 0.3，下部集中载荷为 1×10^6N。

（1）启动 ABAQUS/CAE，进入图形界面。在菜单栏中单击“文件”按钮，选择“新建模型数据库→采用 Standard/Explicit 模型”，如图 2-8 所示，即完成创建一个模型数据库。

（2）单击工具箱中的按钮，弹出图 2-9 所示的“创建部件”对话框，输入部件名称为“truss”，选择“模型空间”为“二维平面”，“基本特征”为“线”，在“大约尺寸”文本框中输入“5000”，单击“继续”。



图 2-8　创建模型数据库



图 2-9　创建部件

（3）单击“继续”按钮后，即进入了图 2-10 所示的绘制草图界面。单击“创建线”按钮，在提示区输入“0，0”，按〈Enter〉键，在提示区继续输入“0，-1000”，按〈Enter〉键，再输入“-1000，0”，单击鼠标中键，完成两个杆件的创建，如图 2-11 所示。

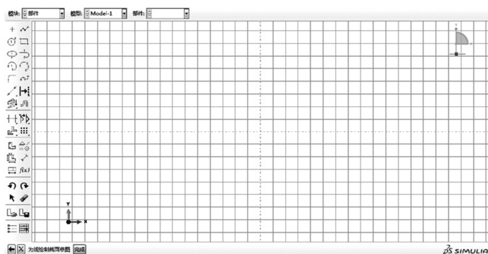


图 2-10 绘制草图界面

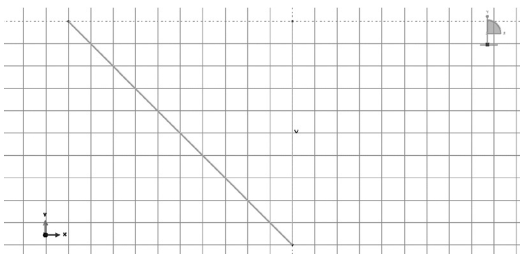


图 2-11 创建两个杆件

完成两个杆件创建后，再单击“桁架”下端点，输入“1000，0”，单击中键完成，再单击中键退出草图环境，如图 2-12 所示。

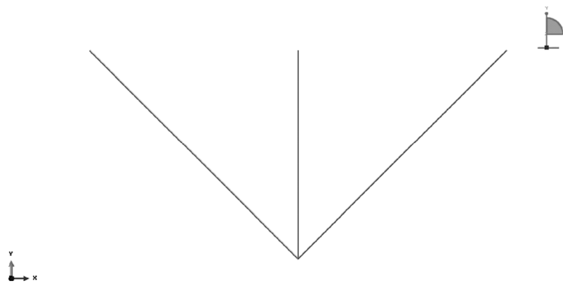


图 2-12 完成几何模型创建

（4）完成部件创建后，用户可以将其保存到模型数据库中。选择“文件”菜单中的“保存”选项，弹出图 2-13 所示的“模型数据库另存为”对话框。

在对话框中输入模型数据库名称，单击“确定”按钮完成保存。

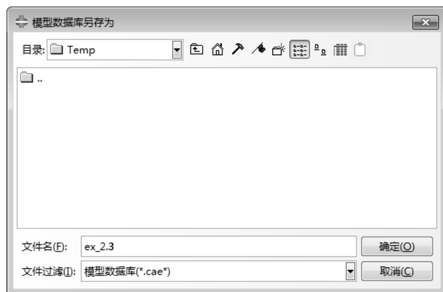


图 2-13 “模型数据另存为”对话框

（5）在环境栏中选择“属性”（Property）模块，在此模块中可以设置模型的截面特性及材料。

单击工具箱中的（创建材料）按钮，弹出图 2-14 所示的“编辑材料”对话框。

在图 2-14 所示的“编辑材料”对话框中输入材料名称为“steel”。描述一栏中可以输入用户对于此种材料的描述，在需要定义大量材料参数时，这些描述可以帮助用户进行整理。

单击“力学”按钮，选择“弹性→弹性”，如图 2-15 所示。此时回到图 2-14 所示的“编辑材料”对话框中可以选择“材料类型”为“各向同性”，输入“杨氏模量”（即弹性模量）为“2E5”，“泊松比”为“0.3”，单击“确定”按钮完成材料属性的定义。



图 2-14 “编辑材料”对话框



图 2-15　选择线弹性材料

（6）单击工具栏中的（创建截面）按钮，弹出图 2-16 所示的“创建截面”对话框。选择“类别”为“梁”，“类型”为“桁架”。

单击“继续”按钮，弹出图 2-17 所示的“编辑截面”对话框，选材料为上一步定义的 steel，输入“横截面面积”为“2500”，单击“确定”按钮，即完成截面定义。



图 2-16 “创建截面”对话框



图 2-17 “编辑截面”对话框

单击工具箱中的（指派截面）按钮，用左键框选整个模型或按住〈Shift〉键单击三个杆件，单击中键，弹出图 2-18 所示的“编辑截面指派”对话框，单击“确定”按钮完成截面指派操作。



图 2-18 “编辑截面指派”对话框

（7）在环境栏中选择“装配”（Assembly）功能模块，用于定义装配件。每个模型只能包含一个装配件。

单击工具箱中的（将部件实例化）按钮，弹出图 2-19 所示的“创建实例”对话框，程序自动选择 truss 部件，其他参数保持默认，单击“确定”按钮，完成实例的创建如图 2-20 所示。



图 2-19 “创建实例”对话框

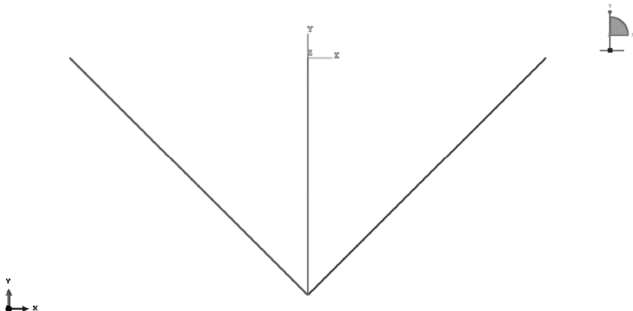


图 2-20 创建实例

（8）在环境栏中选择“分析步”（Step）模块，进步分析步设置。

在工具箱中单击（创建分析步）按钮，弹出图 2-21 所示的“创建分析步”对话框。选择“分析类型”为“静力，通用”，单击“继续”按钮，弹出图 2-22 所示的“编辑分析步”对话框。

用户可以输入分析步的描述，其他的设置如图 2-22 所示，单击“确定”按钮完成分析步的编辑。

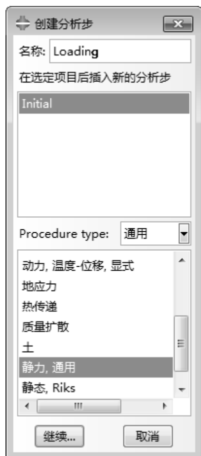


图 2-21 “创建分析步”对话框



图 2-22 编辑分析步

在工具箱中单击（场输出管理器）按钮，弹出图 2-23 所示的“场输出请求管理器”对话框。在“场输出请求管理器” 对话框中单击“编辑”按钮，弹出图 2-24 所示的“编辑场输出请求”对话框，在此对话框中可以设置输出的场变量。

在本例中均采用默认设置即可。



图 2-23 “场输出请求管理器”对话框

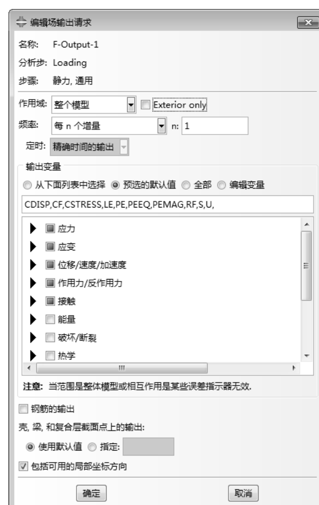


图 2-24 “编辑场输出请求”对话框

（9）在环境栏中选择“载荷”（Load）模块，在此模块中可以定义载荷与边界条件。

在工具箱中单击（创建载荷）按钮，弹出图 2-25 所示的“创建载荷”对话框。选择“类别”为“力学”，“可用于所选分析步的类型”为“集中力”，单击“继续”按钮，单击加载点，即桁架的下端点，再单击“完成”按钮，弹出图 2-26 所示的“编辑载荷”对话框。



图 2-25 “创建载荷”对话框



图 2-26 “编辑载荷”对话框

在“编辑载荷”对话框中，CF1 输入“0”，CF2 输入“-1e6”，单击“确定”按钮，完成载荷定义，此时视图区中有表示已施加载荷的箭头，如图 2-27 所示。

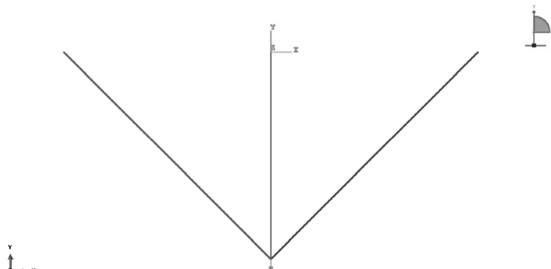


图 2-27 完成加载

（10）在工具箱中单击（创建边界条件）按钮，弹出图 2-28 所示的“创建边界条件”对话框，选择“类别”为“力学”，“可用于所选分析步的类型”为“位移/转角”，单击“继续”按钮。

按住键盘上的〈Shift〉键，选择桁架上端三个点，单击提示区的“完成”按钮，弹出图 2-29 所示的“编辑边界条件”对话框。

勾选 U1、U2、UR3，均输入“0”，单击“确定”完成边界的约束。



图 2-28 “创建边界条件”对话框



图 2-29 “编辑边界条件”对话框

（11）在环境栏中选择“网格”（Mesh）功能模块，进行网格的划分。开始操作之前，需要将对象定义为部件，如图 2-30 所示。



图 2-30 定义操作对象

单击工具箱中的（种子部件）按钮，弹出图 2-31 所示的“全局种子”对话框，单击“确定”按钮，完成网格密度定义，如图 2-32 所示。



图 2-31 “全局种子”对话框

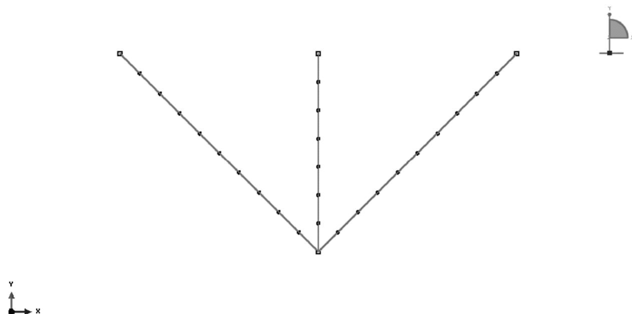
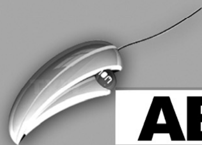


图 2-32 完成网格密度定义

单击工具箱中的（指派单元类型）按钮，在视图区中选择整个模型，单击提示区的“完成”按钮，或单击中键，弹出图 2-33 所示的“单元类型”对话框，选择“单元族”为“桁架”，单击“确定”按钮完成。



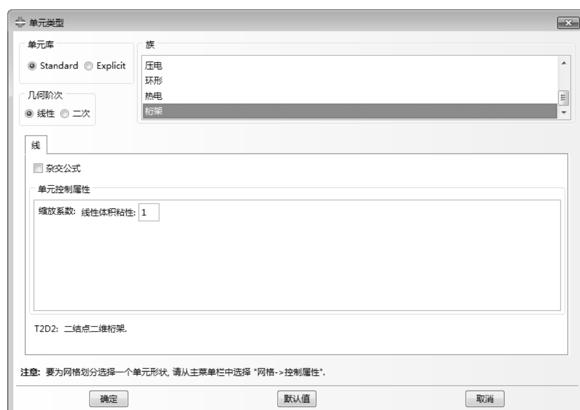


图 2-33 “单元类型”对话框

单击工具箱中的 （为部件划分网格）按钮，单击中键完成网格划分，命令行接口区提示“27 个单元已创建到部件：truss”。

（12）在环境栏中选择“作业”（Job）模块，在此模块中向求解器提交作业。在工具箱中选择 按钮，弹出图 2-34 所示的“创建作业”对话框。

用户可以为本作业输入名称、选择来源及模型数据库，如图 2-34 所示，单击“继续”按钮弹出图 2-35 所示的“编辑作业”对话框。



图 2-34 “创建作业”对话框



图 2-35 “编辑作业”对话框

在本例中“编辑作业”对话框中的设置保持默认即可，单击“确定”按钮完成分析作业的创建。

（13）单击工具箱中的 （作业管理器）按钮，弹出图 2-36 所示的“作业管理器”对话框。



图 2-36 “作业管理器”对话框

单击“提交”按钮。由于模型简单，很快完成运算，作业管理器中作业的状态变为“完成”。

（14）完成运算后，单击“作业管理器”对话框中的“结果”按钮，ABAQUS 即进入可视化模块，如图 2-37 所示。

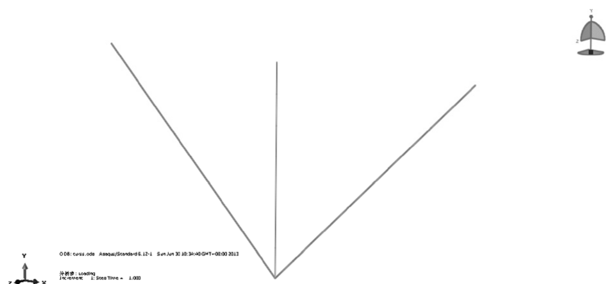


图 2-37　进入可视化模块

（15）单击工具箱中的（通用选项）按钮，弹出图 2-38 所示的“通用绘图选项”对话框。选择“变形缩放系数”为“一致”，输入值为“10”，单击“确定”按钮完成。

单击工具箱中的（绘制变形图）按钮，视图区就绘制出模型的变形图如图 2-39 所示。

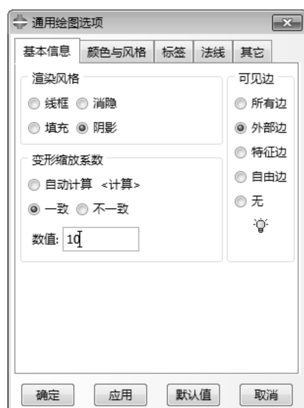


图 2-38 “通用绘图选项”对话框

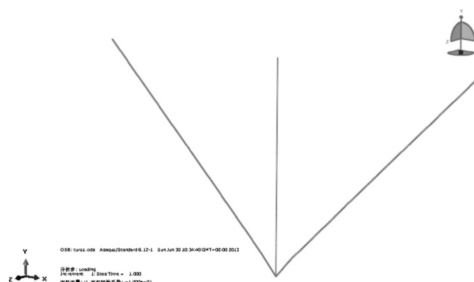


图 2-39　变形图

单击工具箱中的（在变形图上绘制云图）按钮，视图区显示模型的变形 Mises 云图如图 2-40 所示。在工具栏中选择“输出结果”为“RF”，则视图区中显示支座反力的云图如图 2-41 所示。

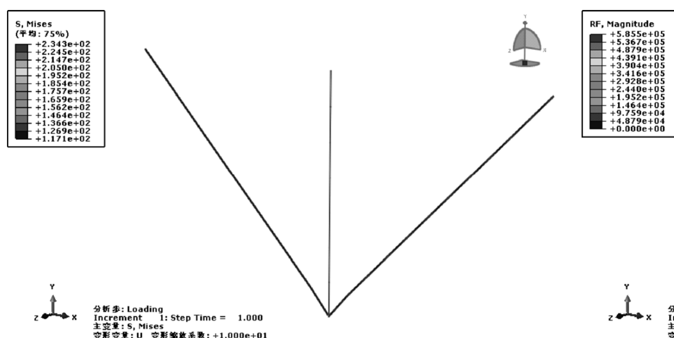


图 2-40　显示 Mises 云图

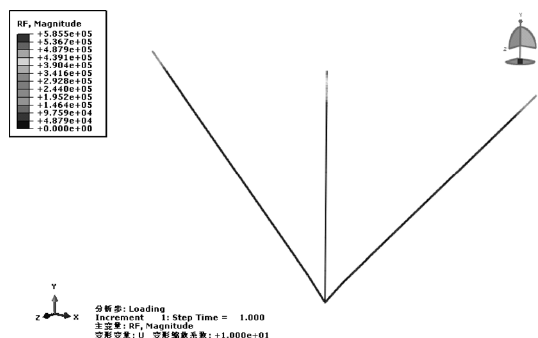


图 2-41　支座反力云图

（16）选择报告菜单中的“场输出”命令，弹出图 2-42 所示的“报告场变量输出”对话框。选择“应力分量”下的“Mises”与“S11”，单击“确定”按钮，在工作目录下即生成一个 Abaqus.rpt 文件，可以用记事本打开，即输出的应力列表，如图 2-43 所示。

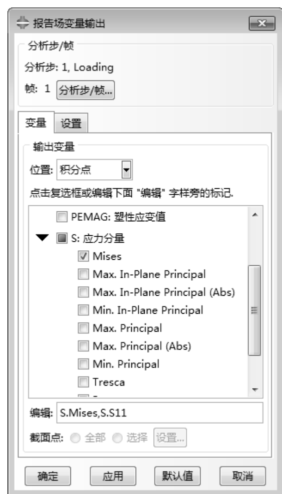


图 2-42 “报告场变量输出”对话框

```
********************************************************************
Field Output Report, written Sun Jun 30 11:27:11 2013

Source 1
---------

  ODB: E:/Work/Abaqus/Temp/turss.odb
  Step: Loading
  Frame: Increment     1: Step Time =    1.000

Loc 1 : 来自源1的积分点值

Output sorted by column "单元标签".

Field Output reported 在积分点处 for part: TRUSS-1

    Element      Int      S.Mises       S.S11
      标签        Pt      @Loc 1       @Loc 1
----------------------------------------------------
       1          1      234.211      234.211
       2          1      234.214      234.214
       3          1      234.221      234.221
       4          1      234.230      234.230
       5          1      234.242      234.242
       6          1      234.258      234.258
       7          1      234.276      234.276
       8          1      117.161      117.161
       9          1      117.148      117.148
      10          1      117.136      117.136
      11          1      117.125      117.125
      12          1      117.116      117.116
      13          1      117.108      117.108
      14          1      117.102      117.102
      15          1      117.097      117.097
      16          1      117.094      117.094
      17          1      117.093      117.093
      18          1      117.161      117.161
      19          1      117.148      117.148
      20          1      117.136      117.136
      21          1      117.125      117.125
      22          1      117.116      117.116
      23          1      117.108      117.108
      24          1      117.102      117.102
      25          1      117.097      117.097
      26          1      117.094      117.094
      27          1      117.093      117.093


     最小               117.093      117.093
    在单元                 27           27
    Int Pt                 1            1

     最大               234.276      234.276
    在单元                  7            7
    Int Pt                 1            1

      总            3.98201E+03  3.98201E+03
```

图 2-43 输出应力列表

（17）完成后处理后，单击（保存模型数据库）按钮，保存最终的模型数据库。然后即可跟所有 Windows 程序一样单击窗口右上角的关闭按钮退出程序。

2.4 本章小结

本章为读者介绍了 ABAQUS 程序的入门知识，在此之后，用户对 ABAQUS 应有一个概要的了解。

用 ABAQUS/CAE 可以形成完整的 ABAQUS 分析模型。求解器（ABAQUS/Standard）会读入 ABAQUS/CAE 产生的输入文件，进行分析计算，并发回信息给 ABAQUS/CAE 供用户监控作业进程，同时生成输出数据库。用户可用可视化（Visualization）模块读入输出数据库并观看分析结果。

一旦模型生成，用户可进行数据检查分析。所产生的出错与警告信息会输出到一个数据文件中。若数据检查成功通过，就会把进行模拟分析所需的计算机资源估计信息输出到数据文件。

在数据检查阶段，可以用 ABAQUS/CAE 中的可视化（Visualization）模块，调用所生成的输出数据库文件，从图形上检验模型的几何形状和边界条件。



通常在数据文件（.dat）中最容易检查出材料参数有否错误。在图形后处理器（如 ABAQUS/CAE 的可视化模块）中检查几何形状、载荷和边界条件是较方便的。

在分析中应该检查结果是否满足工程基本原理，如是否满足静力平衡等。可以用多种方法从 ABAQUS/CAE 中的可视化模块中观看分析结果。

第 3 章　建 立 模 型

建立模型是进行任何有限元分析的第一步实际操作（不包括对案例的初步分析及分析方案规划）。一个合理的模型最重要的特点在于既可以满足足够的精度要求，又能节约计算成本。

ABAQUS 强大的建模功能可以直接建立十分复杂的几何模型，也可以接受由外部数据导入的模型。本章将为读者介绍如何在 ABAQUS/CAE 中建立（导入）模型、完成装配并为之定义材料属性。

本章学习目标

- 掌握 ABAQUS 部件模块的使用方法
- 掌握草图绘制方法
- 掌握基于特征建模的思想与方法
- 掌握 ABAQUS 属性模块的使用方法
- 掌握 ABAQUS 中材料与截面的概念
- 掌握 ABAQUS 装配模块的使用方法
- 掌握模型导入的方法

3.1　部件与草图（Part& Sketch）

部件是组成一个模型的基本单位，ABAQUS 的部件是基于特征生成的模型，基于特征的建模方式使用得 ABAQUS 可以以一种接近于实际加工过程的方式非常方便地建立复杂的模型。

基于特征建立模型的基本要素之一是草图。由草图生成特征，特征形成部件，从而得到一个基本模型。

3.1.1　部件模块简介

进入 ABAQUS/CAE 界面，第一个功能模块即为“部件”（Part），如图 3-1 所示为部件模块的工具箱。工具箱左上角第一个为（创建部件）按钮，单击弹出图 3-2 所示的“创建部件”对话框。

在图 3-2 所示的“创建部件”对话框中，可以定义模型空间（二维模型、三维模型或轴对称模型），定义部件特性（刚体、可变形体），定义几何图元的特性（实体模型、线框模型、壳体等），定义生成该特征的方式（通过拉伸、旋转或是扫掠）。给出一个大致的模型尺寸可以使部件以合适的比例完整显示在视图区中。

部件类型含义如表 3-1 所示。



图 3-1 部件工具箱



图 3-2 “创建部件”对话框

表 3-1 部件类型

类　型	功　能
可变形	可以创建或导入任意形状的模型并定义为可变形部件。可变形部件在载荷的作用下可以发生形状改变，载荷可以是结构力、电磁场或热等。默认情况下，ABAQUS/ CAE 创建的部件是可变形的
离散刚性	近似于可变形部件，通常用于接触分析，可以用于模拟任意形状的部件
解析刚性	与离散刚性部件类似，用于模拟接触分析中的刚性接触面。解析刚性部件的形状不是任意的，只能用于直线、圆弧与抛物线
欧拉	欧拉部件用于定义一个域，其中的材料可以流动，用于欧拉分析。

CATIA 用户对此过程应非常熟悉，这与在 CATIA 中建模的操作习惯是基本一致的。

在图 3-2 所示的“创建部件”对话框中“名称”输入 Cylinder，部件“大约尺寸”为“100”，“模型空间”选择“三维”，“类型”选取“可变形”，基本特征“类型”为“拉伸”，单击“继续”按钮，进入草图视图。

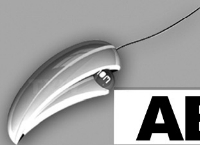
如图 3-3 所示为草图工具箱，单击（创建圆）按钮，输入圆心坐标“0，0”，单击中键，再输入圆周上一个点的坐标“0，50”，单击中键，弹出图 3-4 所示的“编辑基本拉伸”对话框，“深度”输入“80”，单击“确定”按钮，在视图区中生成一个半径 50、高 80 的圆柱，如图 3-5 所示。



图 3-3 草图工具箱



图 3-4 “编辑基本拉伸”对话框



此时在模型树中用户可以查看到上一步生成的名为“cylinder”的特征，如图 3-6 所示。

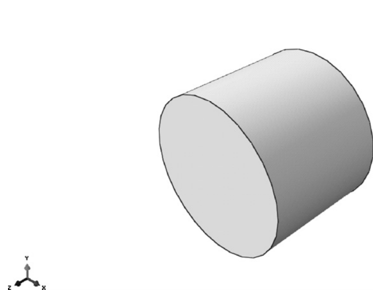


图 3-5　生成圆柱

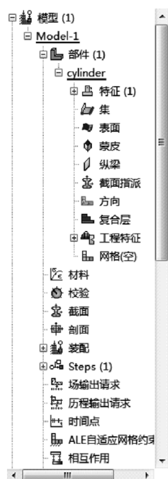


图 3-6　模型树中的特征

3.1.2 建模实例——灭火器启动开关

接下来将为读者讲解如何利用 ABAQUS 强大的建模功能建立一个零件的过程。

（1）单击“创建部件”按钮，弹出图 3-7 所示的“创建部件”对话框，输入部件“名称”为“switch”，定义为三维实体模型，建立“类型”为“旋转”，“大约尺寸”输入“250”，单击“继续”按钮，进入草图视图。

（2）单击按钮，输入起点坐标“0，0”，单击中键，然后单击鼠标，勾勒出图 3-8 所示的图形，此时不需要注意线的长度。



图 3-7　创建 switch 部件

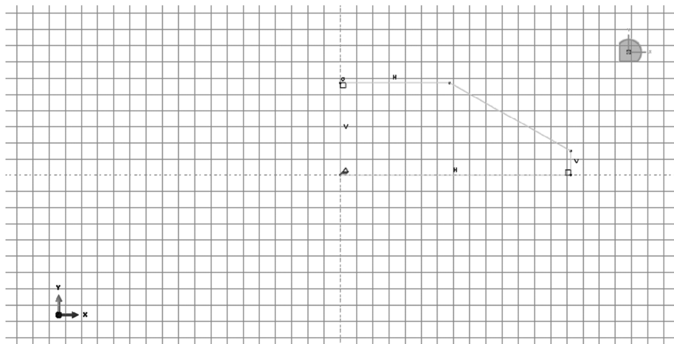


图 3-8　生成圆

（3）单击按钮，单击视图区中最长水平线，将鼠标略移开再单击，即为此线添加了长度尺寸。重复上述操作，为视图区中的所有水平线及竖直线添加长度尺寸，如图 3-9 所示。

（4）单击按钮，再单击图中的一个尺寸标注，弹出图 3-10 所示的“编辑尺寸”对话框，输入修改尺寸的值，单击“确定”按钮即可对此线长度进行修改。

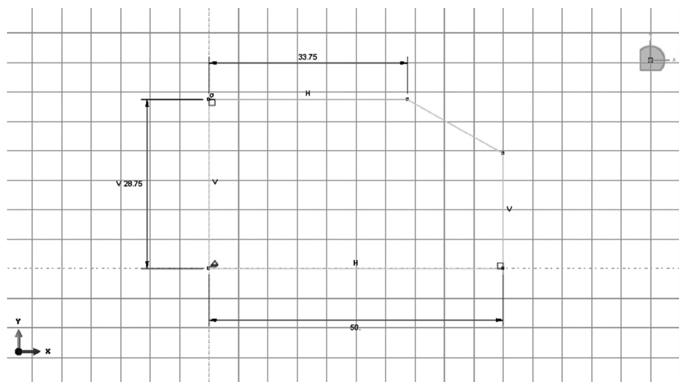




图 3-9　添加尺寸　　　图 3-10 “编辑尺寸”对话框

重复上述操作，将图中的尺寸修改为如图 3-11 所示。

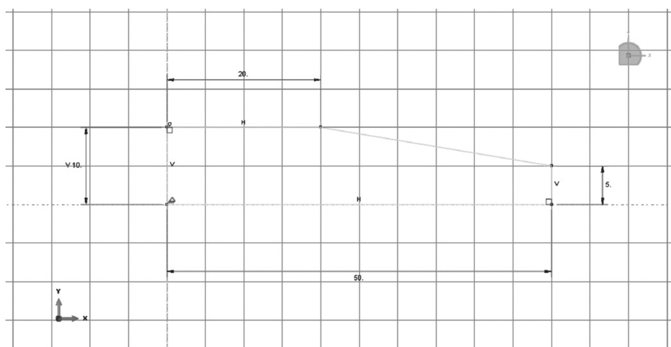


图 3-11　完成尺寸标注

（5）完成尺寸标注后，单击提示区的“确定”按钮，弹出图 3-12 所示的“编辑旋转”对话框，输入旋转“角度”为“360”，单击“确定”按钮生成一个圆台，如图 3-13 所示。



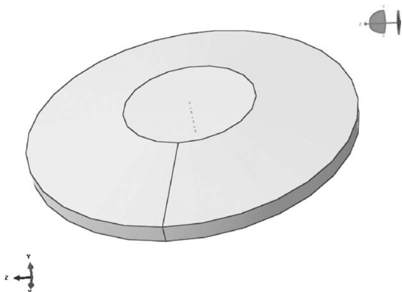


图 3-12 “编辑旋转”对话框　　　图 3-13　生成圆台

（6）单击工具箱中的按钮，根据提示区的提示信息，选择圆台上端面为草图平面（见图 3-14），单击中键，再选择圆台的母线为参考线，进入草图视图，如图 3-15 所示。

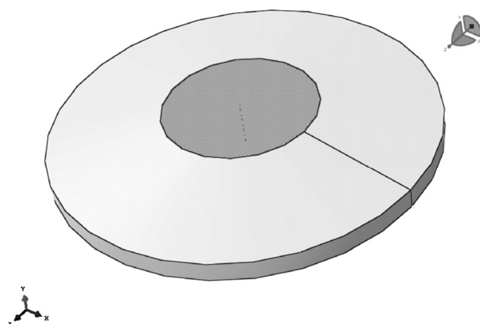


图 3-14　草图平面

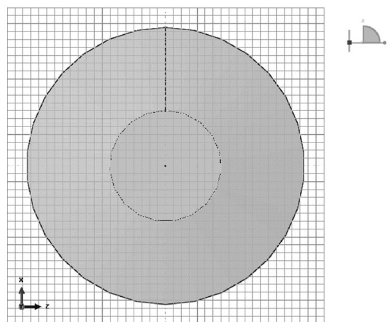


图 3-15　进入草图视图

（7）单击工具箱中的按钮，拾取圆台上端面见图 3-16，将其投影到草图中。单击按钮，在草图中绘制两个矩形，如图 3-17 所示。

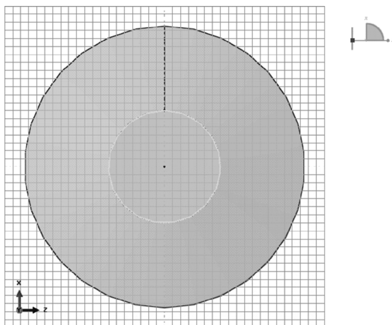


图 3-16　投影

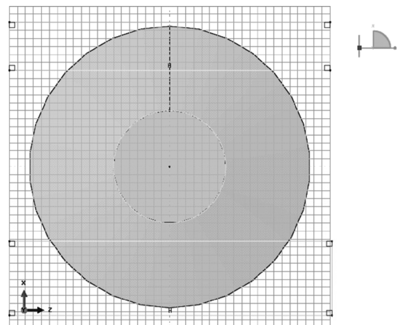


图 3-17　绘制矩形

使用按钮为两个矩形添加图 3-18 所示的尺寸，水平方向尺寸不必理会，矩形长度比圆台最大直径大、左右两边均超出即可。

完成标注后单击提示区的“完成”按钮或单击中键，弹出图 3-19 所示的“编辑切削拉伸”对话框。注意：“类型”应为“通过所有”，单击“确定”按钮完成切削，被切削后的模型如图 3-20 所示。

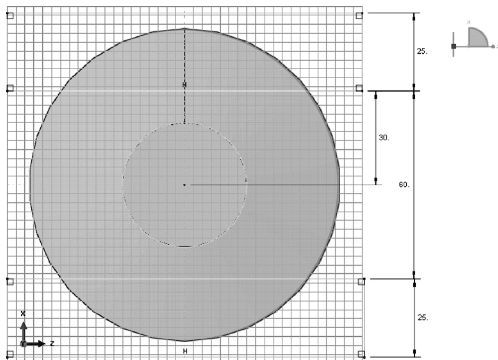


图 3-18　标注尺寸



图 3-19 “编辑切削拉伸”对话框

（8）单击工具箱中的按钮，根据提示区的提示信息，选择圆台上端面为草图平面（见图 3-21），单击中键，再选择圆台的母线为参考线，进入草图视图，如图 3-22 所示。

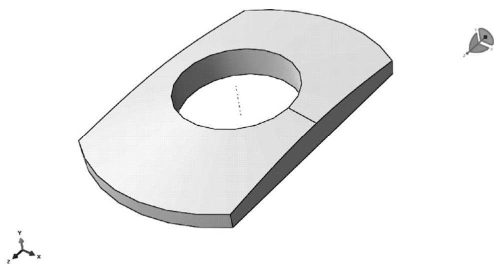


图 3-20　完成切削

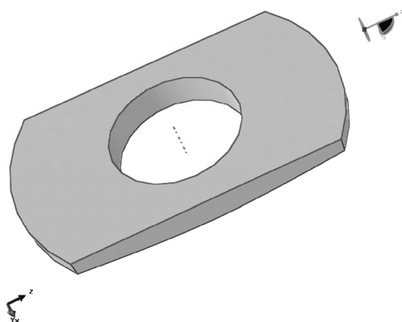


图 3-21　草图平面

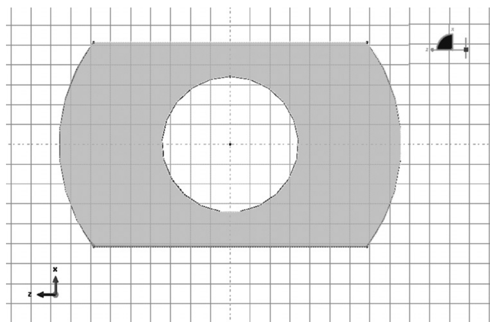


图 3-22　进入草图视图

（9）单击按钮，在草图中随意绘制两个不重叠不同心的圆，使用按钮为两个圆添加尺寸标注，如图 3-23 所示。

完成尺寸标注后单击中键，在“编辑切削拉伸”对话框中设置切削的深度与方向，如图 3-24 所示，单击“确定”按钮完成切削，此时模型如图 3-25 所示。

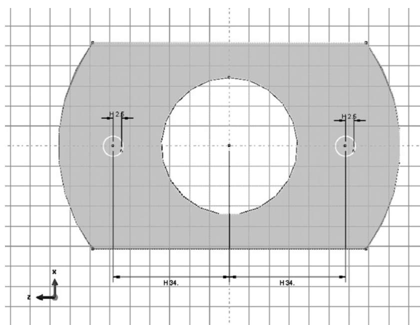


图 3-23　绘制圆



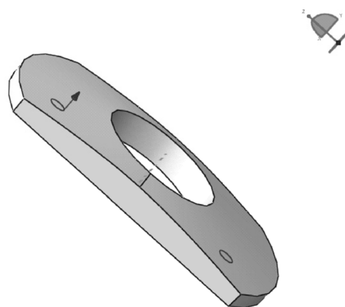


图 3-24　编辑切削拉伸

图 3-25　打孔

（10）单击工具箱中的按钮，按住〈Shift〉键选拾取四个边（见图 3-26），单击中键继续，在提示区中输入圆角半径“5”，单击中键完成倒圆角，如图 3-27 所示。

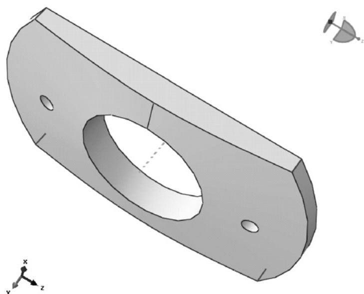


图 3-26　选择要倒圆角的边

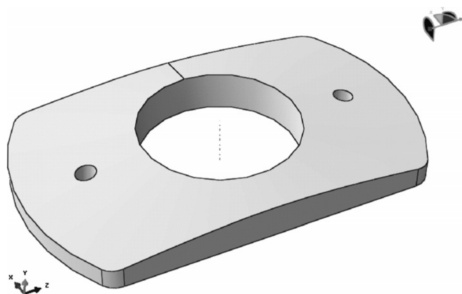


图 3-27　完成倒圆角

（11）单击按钮，按住〈Shift〉键选择大孔上下端两个圆（见图 3-28），单击中键，输入倒角尺寸为“2”，单击中键完成，完成倒角，如图 3-29 所示。

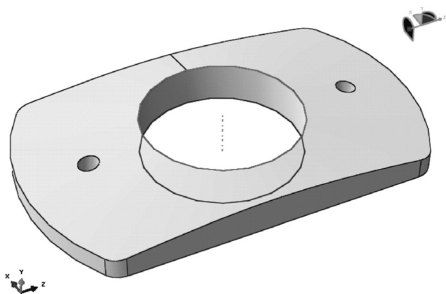


图 3-28　选中倒角边

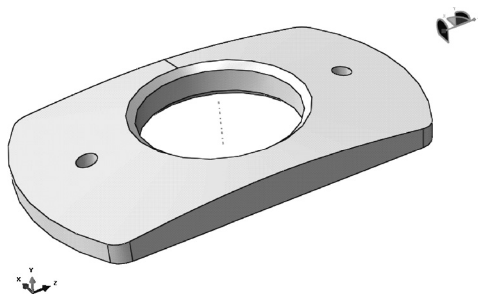


图 3-29　倒角

（12）单击按钮，按住〈Shift〉键选择小孔两个圆（见图 3-30），单击中键，输入倒角尺寸为“0.5”，单击中键完成，完成倒角，如图 3-31 所示。

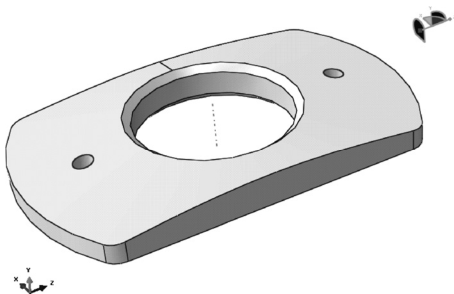


图 3-30　选中倒角边

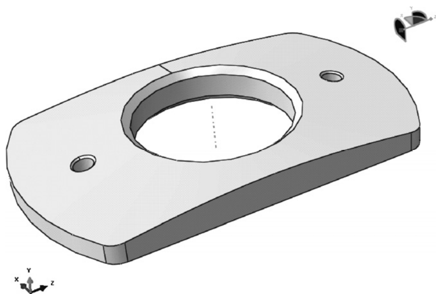


图 3-31　小孔倒角

（13）单击工具箱中的按钮，按住〈Shift〉键选拾取四个边（见图 3-32），单击中键继续，在提示区中输入圆角半径“1”，单击中键完成倒圆角，如图 3-33 所示。

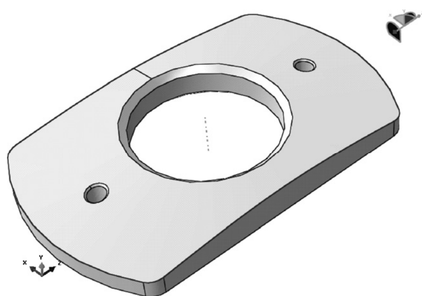


图 3-32　选择要倒圆角的边

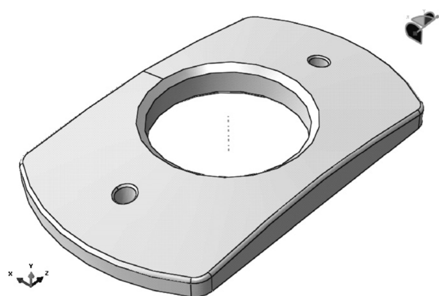


图 3-33　完成倒圆角

至此完成 Switch 零件的建立。

3.2　属性（Property）

ABAQUS 中的属性特指材料与截面特征。在“属性”（Property）模块中，可以为模型指定材料参数。ABAQUS 可以模拟复杂的材料行为，使材料表现出接近实际的力学特征，其关键即在于定义合理的材料与截面参数。

3.2.1 属性模块简介

选择环境栏中的“属性”（Property）模块，在此模块中可以进行材料与截面属性的设置以及弹簧、阻尼、实体表面壳的定义等。进入 ABAQUS/CAE 界面，单击按钮，打开本节资料文件夹中的 switch.cae 模型数据库，即在视图区中看到 3.1 部件与草图（Part& Sketch）所建立的 Switch 部件。“属性”工具箱如图 3-34 所示。

单击工具箱中的按钮，弹出图 3-35 所示的“编辑材料”对话框。

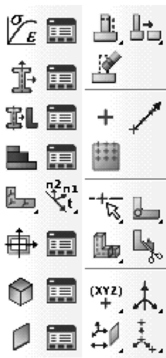


图 3-34 “属性”工具箱



图 3-35 “编辑材料”对话框

在图 3-35 所示的“编辑材料”对话框可以定义本材料的名称，如图 3-35 所示为 Steel，用户可以为这一材料定义一个描述，方便分析时查阅，如本例定义为 Medium carbon steel（中碳钢）。

在“编辑材料”对话框中，可以定义材料行为，如图 3-36 所示，有“通用”“力学”“热学”“Electical/Magnetic”（电磁）和“其他”5 个选项及一个“删除”按钮。通用选项各项目功能如表 3-2 所示。

表 3-2　通用选项

项　　目	功　　能
密度	用于定义材料密度。动态分析中必须定义每一种材料的密度，才可以形成质量矩阵
非独立变量	用于定义状态变量矩阵的维数
正则化	用于定义应变速率，仅在 ABAQUS/Explicit 适用
用户材料	用于定义用户自定的材料，包含力学、热学及热力学 3 种类型
用户定义场	使用 USDFILD 用户子程序定义场变量
用户输出变量	使用 UVARM 用户子程序定义输出变量

以“力学”选项为例，如图 3-37 所示，有弹性、塑性、粘性等大量材料模型可选，具体应用将会在后文中结合实例详细讲解，本节仅作概要的介绍。



图 3-36　材料行为



图 3-37　材料的力学行为

在本节示例中，定义材料为弹性材料，弹性模量为 200GPa，泊松比为 0.27。如图 3-38 所示，在“杨氏模量”一项中输入“2E11”，在“泊松比”一项目中输入“0.27”。

如图 3-39 所示，弹性材料还有许多选项可用。具体功能含义如下。

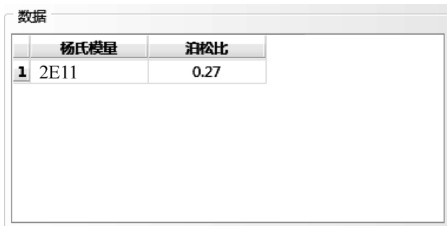


图 3-38　材料数据

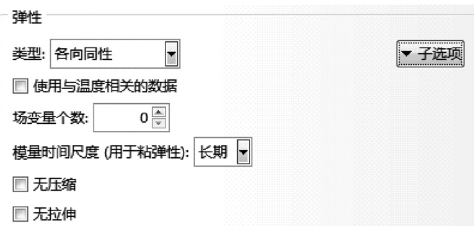


图 3-39　弹性材料选项

- 类型：可以定义材料是各向同性材料、各向异性材料等材料属性。默认为各向同性材料，只含有杨氏模量与泊松比。
- 使用与温度相关的数据：勾选该项意味着本材料的属性是温度的函数。
- 场变量个数：用于设置场变量的数目，默认为 0。
- 模量时间尺度：用于选择粘弹性材料的弹性响应。“长期”用于材料受到持续的力的作用时；“瞬态”则用于材料受瞬时的力的作用。
- 无压缩/无拉伸：这两个选项用于定义材料不产生压应力或拉应力，适用于桁架单元和梁单元。
- 子选项：用于定义材料的破坏应力或破坏应变。

3.2.2 创建材料

单击按钮，新建一个材料，定义为 BONE，如图 3-40 所示。选择“力学”选项中“弹性”材料，如图 3-41 所示。

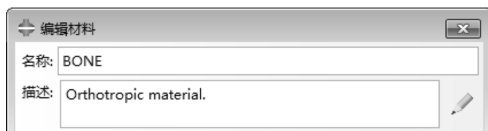


图 3-40 输入材料名称



图 3-41 各向异性材料

正交各向异性线弹性材料的刚度矩阵如下。

$$\begin{Bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{13}\\ \sigma_{23}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0\\ D_{1122} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0\\ D_{1133} & D_{2233} & D_{3333} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{12}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{23}\end{Bmatrix}=[D^{el}]\begin{Bmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ \gamma_{12}\\ \gamma_{13}\\ \gamma_{23}\end{Bmatrix} \tag{3-1}$$

刚度矩阵中的 9 个独立弹性常数与弹性模量、泊松比的关系如下。

$$\begin{cases}D_{1111}=E_1(1-v_{23}v_{32})\gamma\\ D_{2222}=E_2(1-v_{13}v_{31})\gamma\\ D_{3333}=E_3(1-v_{12}v_{21})\gamma\\ D_{1122}=E_1(v_{21}+v_{31}v_{23})\gamma=E_2(v_{12}+v_{32}v_{13})\gamma\\ D_{1133}=E_1(v_{31}+v_{21}v_{32})\gamma=E_3(v_{13}+v_{12}v_{23})\gamma\\ D_{2233}=E_2(v_{32}+v_{12}v_{31})\gamma=E_3(v_{23}+v_{21}v_{13})\gamma\\ D_{1212}=G_{12}\\ D_{1313}=G_{13}\\ D_{2323}=G_{23}\end{cases} \tag{3-2}$$

其中：

$$\gamma=\frac{1}{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{12}\nu_{32}\nu_{13}} \qquad (3\text{-}3)$$

对本例中的材料模型：$E_1=E_2=13\text{GPa}$，$E_3=19\text{GPa}$，$G_{12}=G_{13}=G_{23}=5.3\text{GPa}$，$\nu_{12}=\nu_{21}=0.22$，$\nu_{32}=\nu_{31}=0.42$，$\nu_{13}=\nu_{23}=0.29$。

代入上述公式，计算得 9 个参数，结果如图 3-42 所示，将它们分别填写入数据区的表格中。

数据

	D1111	D1122	D2222	D1133	D2233	D3333	D1112
1	17912.43826	6971.61398	17912.43826	10451.30194	10451.30194	28367.81955	

图 3-42　各向异性材料参数

3.2.3 创建与指派截面

ABAQUS/CAE 不能直接把材料属性赋予模型，必须先创建包含材料属性的截面属性，然后将截面属性指派给模型的各个部分。

单击按钮，弹出图 3-43 所示的“创建截面”对话框。ABAQUS/CAE 提供了多种截面类型。具体功能含义如下。

- 实体：用于定义实体截面特性，可以定义均质实体、广义平面应变实体、欧拉实体及复合材料等。
- 壳：用于定义壳体截面，有均质、复合、膜、表面及通用壳刚度选项，其中表面与膜类似，但后者厚度为 0。
- 梁：用于定义梁的截面特性，有梁与桁架可选。可以定义梁的截面形状与尺寸。
- 流体：用于定义三维流体特性，只用于 ABAQUS/CFD 中，有均质流体可选。
- 其他：ABAQUS/CAE 提供的其他截面类型，有垫圈、粘性、声学无限和声学界面可选。

在本例中选用均质实体模型。输入截面名称后，单击“继续”按钮，弹出图 3-44 所示的“编辑截面”对话框。



图 3-43 “创建截面”对话框



图 3-44 “编辑截面”对话框

在图 3-44 所示的“编辑截面”对话框中可以选择所包含的材料类型，单击“确定”按钮完成截面的定义。

完成截面定义后，为模型指派截面。单击按钮，然后在视图区中拾取要指派的对像，如果有多个对象要拾取，则应按住键盘上的〈Shift〉键，完成拾取后，单击中键，弹出图 3-45 所示的“编辑截面指派”对话框。

在图 3-45 所示的“编辑截面指派”对话框中选择截面名称，单击“确定”按钮即完成截面的指派。此时模型如图 3-46 所示，模型的颜色从灰色变为图 3-46 所示颜色。



图 3-45 “编辑截面指派”对话框

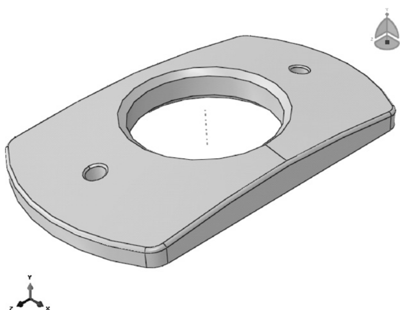


图 3-46　完成截面指派

在此引入分区的概念。分区是 ABAQUS/CAE 中能赋予材料与截面属性的小单元。建立模型的时候，用户可以选择在基础模型增加的部分是否为一个新分区。

如果在定义材料的时候发现需要单独分配截面的部分没有分出来，可以使用图 3-47 所示的分割工具进行分割。

在图 3-48 所示的“创建分区”对话框中可以定义分割生成新分区的方式。



图 3-47　分割工具



图 3-48 “创建分区”对话框

在实体截面中的截面定义并不很直观，接下来为读者介绍更为直观的截面——梁。梁的截面与实体截面不同，它确确实实是在工程能看到的“截面”，而非像实体一样只是为了给模型定义材料属性而需要进行的一步操作。

单击按钮，弹出图 3-49 所示的“创建截面”对话框，输入截面的名称，选择截面类型为梁截面，如图 3-49 所示，单击“继续”按钮，弹出图 3-50 所示的“编辑梁方向”对话框。

在图 3-50 所示的“编辑梁方向”对话框中，图 3-51 所示的“梁形状”选项组用于梁截面形状的定义。单击“梁形状”选项组中的按钮，弹出图 3-52 所示的“创建剖面”对话框。

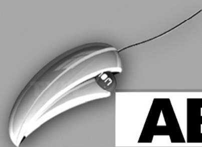




图 3-49 “创建截面”对话框

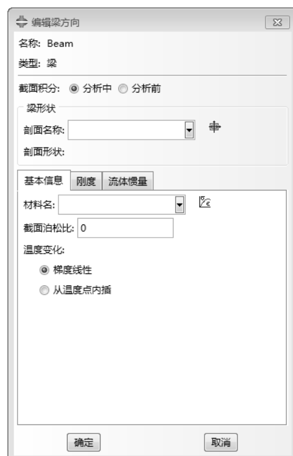


图 3-50 “编辑梁方向”对话框

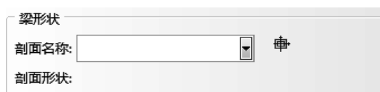


图 3-51 “梁形状”选项组



图 3-52 “创建剖面”对话框

在图 3-52 所示的“创建剖面”对话框中输入剖面的名称，选择形状为“I 形”（也即工字梁），单击“继续”按钮，弹出图 3-53 所示的“编辑剖面”对话框。

在图 3-53 所示的“编辑剖面”对话框输入 I 形剖面的参数，单击“确定”按钮完成剖面定义。此时“梁形状”组合框内显示定义好的剖面形状如图 3-54 所示。

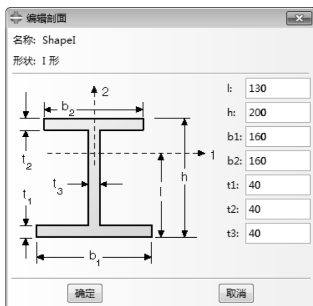


图 3-53 “编辑剖面”对话框

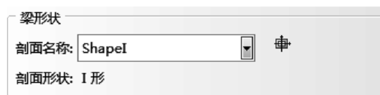


图 3-54 显示梁剖面形状

完成剖面形状定义后，在“编辑梁方向”对话框中继续编辑其他信息。在图 3-55 所示的“基本信息”选项卡中，可定义截面所要选择的材料，既可以选择现有的，也可以通过按钮新建材料。还可以输入“截面泊松比”，取值范围-1～0.5，默认为 0。“温度变化”选项用于定义与温度相关的材料特性。在图 3-56 所示的“刚度”选项卡中，可以设置横向剪切刚度及补尝因子的设置。



图 3-55 “基本信息”选项卡



图 3-56 “刚度”选项卡

在图 3-50 所示的“编辑梁方向”对话框中，选择“截面积分”为“分析前”时，“基本信息”如图 3-57 所示。用户可以输入杨氏模量、剪切模量、定义材料截面泊松比、指定材料特性与温度的关系等。在图 3-58 所示的“阻尼”选项卡中，用户可以定义材料的刚性比衰减因子。“输出点”选项可以通过输入梁截面上的局部坐标值来指定应力或应变的输出点。



图 3-57 基本信息（分析前）

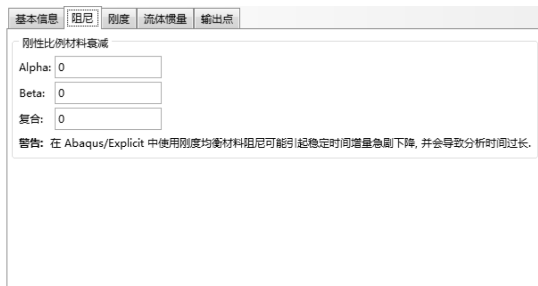


图 3-58 材料阻尼设置

在进行分析前，用户还需要定义梁的截面方向。单击按钮，在视图区中选择要定义的梁，单击中键，在提示区中输入梁截面的局部坐标的 1 方向，单击两次中键完成。

单击菜单栏中的“特殊设置”按钮，如图 3-59 所示，可以进行一些特殊操作，包括蒙皮、纵梁、惯性及弹簧/阻尼器。



图 3-59 特殊设置菜单

■ 蒙皮

用户可以为实体模型的面或轴对称模型的边附着一层蒙皮，蒙皮的材料可以与部件的材料不同。蒙皮不可以重叠，一个表面只可以定义一个蒙皮，ABAQUS 自动对位于部件表面的蒙皮划分网格，不需要单独对其进行划分网格。

■ 纵梁

纵梁，即加强筋，接合在已建立的部件的边缘。用户可以选择三维模型或二维模型的边缘。定义纵梁的部件既可以是 ABAQUS 部件，也可以是孤立的网格。

纵梁应被视作一个部件的一个属性，如同截面属性是部件的属性一样。

■ 惯性

此功能可以为部件指定各种惯量，如质点、转动惯量、非结构质量及热容等。

■ 弹簧/阻尼器

用户可以定义不同的弹簧或阻尼器，如图 3-60 所示，可以连接两点或将指定点接地。在图 3-61 所示的“编辑弹簧/阻尼器”对话框中，可以定义弹簧或阻尼特性及其方向。



图 3-60 创建弹簧/阻尼器



图 3-61 “编辑弹簧/阻尼器”对话框

3.3 装配（Assembly）

选择环境栏中的“装配”（Assembly）模块，即进入装配功能模块。一个模型只能包含一个装配实例，一个装配实例中可以有多个部件，一个部件也可被多次调用来组成装配件。即使最终的模型只有一个构件，也必须进行装配，才能定义载荷、边界条件和相互作用。

3.3.1 导入部件

用于装配的部件可以直接在 ABAQUS/CAE 中建立，也可以由其他 CAD 软件建立。ABAQUS 提供了丰富的接口，可以接受多种 CAD 软件的模型文件，也可以接受多种通用图形数据交换格式，如图 3-62 所示。

执行菜单栏中的“文件→导入→部件”命令，即可以实现部件的导入。如图 3-63 所示，选择本节示例文件夹中的“abq_lian-gan-ti_1_.stp”文件，单击“确定”按钮弹出图 3-64 所示的“从 STEP 文件创建部件”对话框，输入部件名称为“connecting_rod”，单击“确定”按钮完成部件的导入。



图 3-62　ABAQUS/CAE 可接受的导入格式

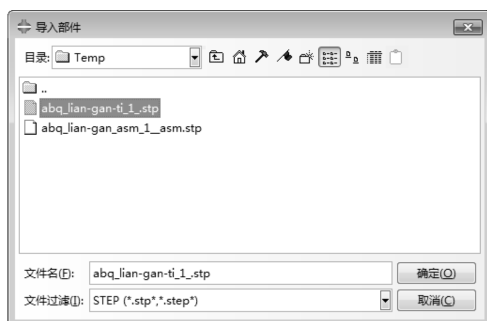


图 3-63　导入部件



图 3-64　“从 STEP 文件创建部件”对话框

导入的部件如图 3-65 所示。

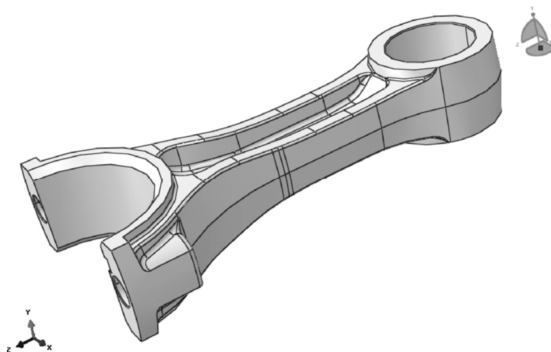
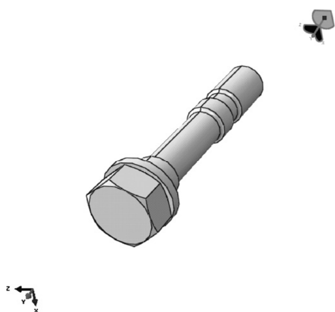
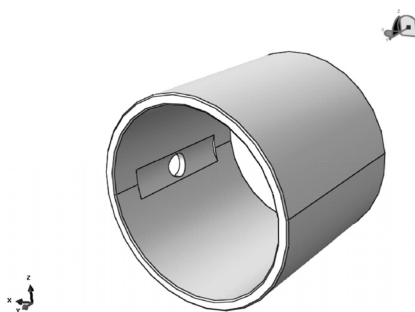
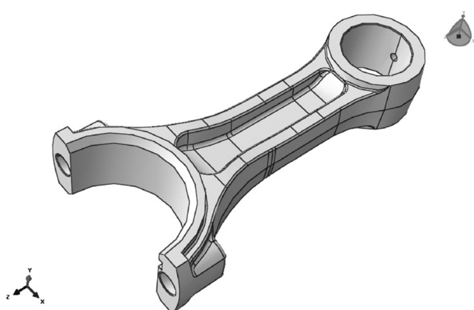


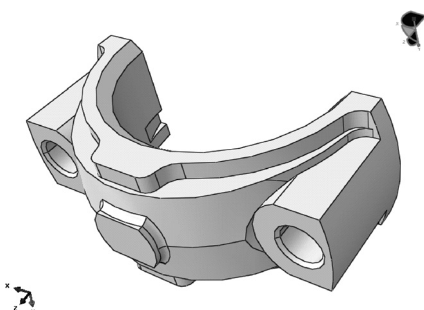
图 3-65　导入部件

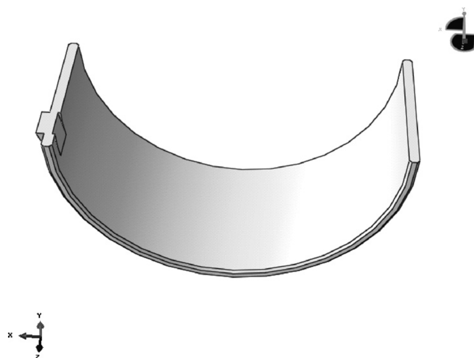
重复上述操作，导入示例文件夹中的其他 STEP 文件，如图 3-66～图 3-70 所示的。


图 3-66　螺栓


图 3-67　衬套


图 3-68　连杆体


图 3-69　连杆盖


图 3-70　轴瓦

3.3.2 装配实例——发动机连杆组件

以上述部件为基础，接下来将为读者介绍如何进行 ABAQUS 中的装配操作。

（1）进入装配模块后，单击按钮，弹出图 3-71 所示的“创建实例”对话框，选择“Enginebearing”，选择“非独立（网格在部件上）”，单击“确定”按钮完成轴瓦的实例化，如图 3-72 所示。

（2）单击按钮，拾取轴瓦，单击中键，弹出图 3-73 所示的“环形阵列”对话框，输入“个数”为“2”，“总角度”为“180”，单击拾取 Y 轴为转轴，再单击中键，完成的阵列如图 3-74 所示。



图 3-71 “创建实例”对话框 1

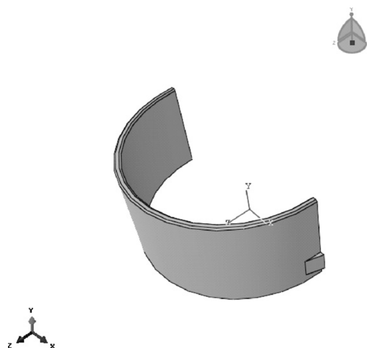


图 3-72 轴瓦实例化



图 3-73 “环形阵列”对话框

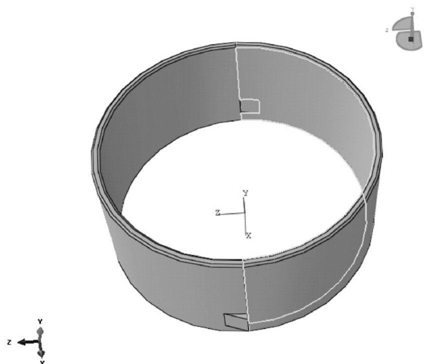


图 3-74 完成阵列

（3）单击按钮，弹出图 3-75 所示的“创建实例”对话框，选择“Connecting_rod”，选择“非独立（网格在部件上）”，单击“确定”按钮完成连杆体的实例化，如图 3-76 所示。



图 3-75 “创建实例”对话框 2

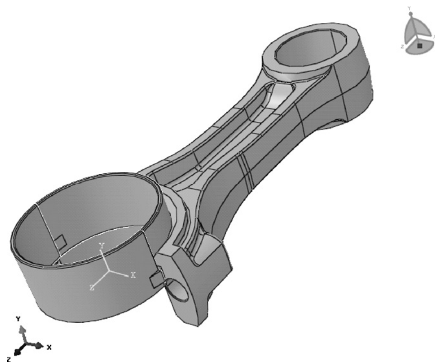
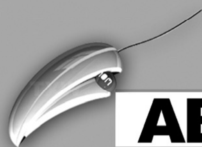


图 3-76 连杆体实例化

（4）单击按钮，拾取连杆体部件，单击中键，在提示区输入旋转轴起点“0，0，0”；单击中键，再输入旋转轴终点“0，0，10”；单击中键，输入旋转角为“180”；单击中键完成旋转，如图 3-77 所示。注意轴承缺口的位置变化。

（5）单击（共面约束）按钮，拾取缺口上对应的面（见图 3-78），注意图中箭头的方向。应注意先拾取轴瓦上的点，再拾取连杆体，然后单击两次中键，完成工作面约束。



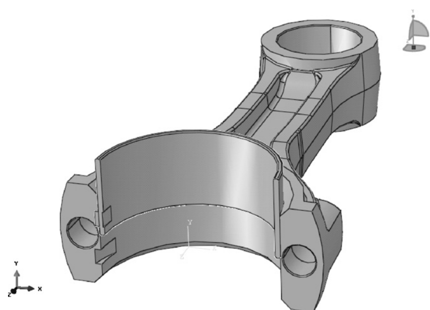


图 3-77　旋转连杆体

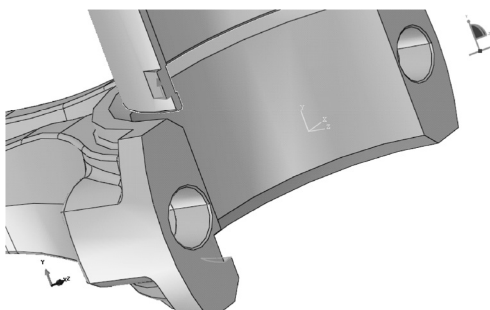


图 3-78　约束面

（6）单击（共面约束）按钮，拾取端面上对应的面（见图 3-79），注意图中箭头的方向。应注意先拾取轴瓦上的点，再拾取连杆体，然后单击两次中键，完成工作面约束，如图 3-80 所示。

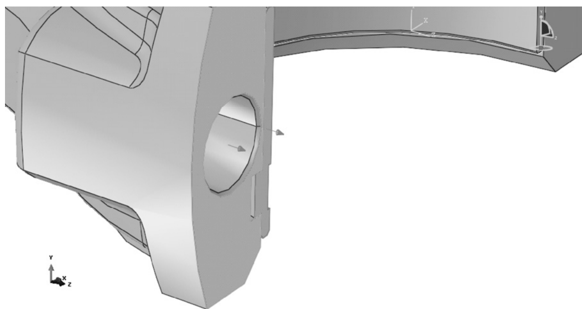


图 3-79　约束面

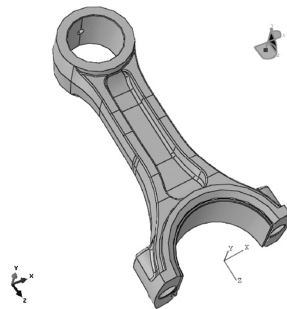


图 3-80　完成约束

（7）单击按钮，弹出图 3-81 所示的“创建实例”对话框，选择“Connecting_rod_upside”，选择“非独立（网格在部件上）”，单击“确定”按钮完成连杆盖的实例化，如图 3-82 所示。



图 3-81　“创建实例”对话框

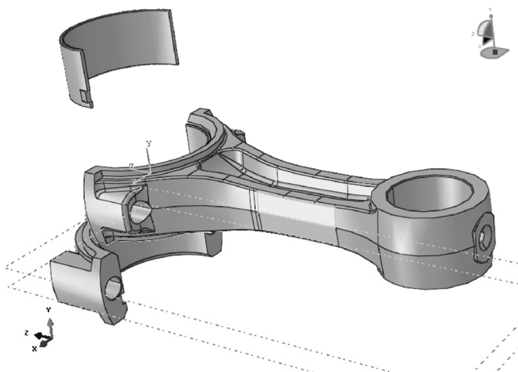


图 3-82　连杆盖实例化

（8）参照第 5 步与第 6 步，将另半个轴瓦与连杆盖约束，如图 3-83 所示。

（9）单击按钮，弹出图 3-84 所示的“创建实例”对话框，选择“Bolt”，选择“非独立（网格在部件上）”，单击“确定”按钮完成螺栓的实例化，如图 3-85 所示。

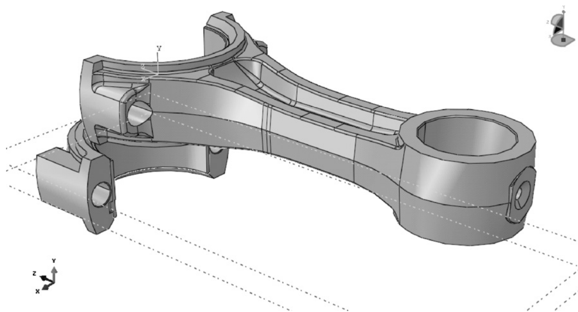


图 3-83 约束轴瓦



图 3-84 “创建实例”对话框

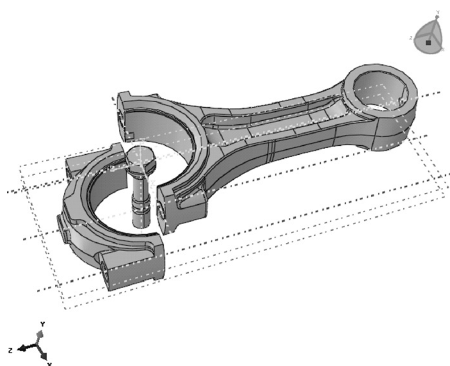


图 3-85 螺栓实例化

（10）单击按钮，拾取图 3-86 所示的螺栓柱面与连杆盖的孔内表面，选取时注意箭头方向，单击中键完成约束，如图 3-87 所示

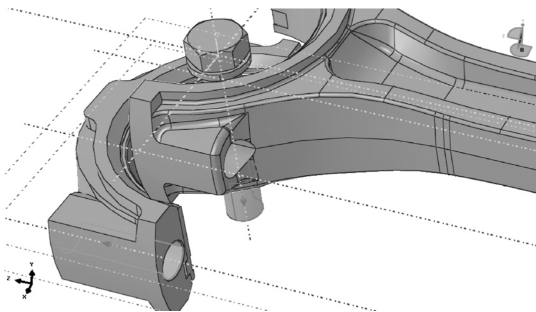


图 3-86 约束面

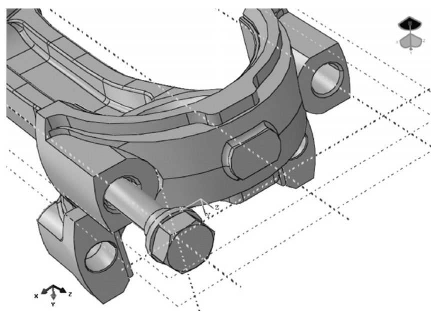


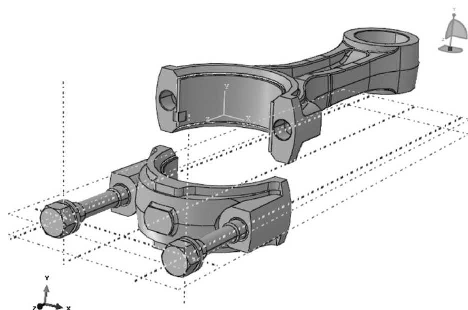
图 3-87 共轴约束

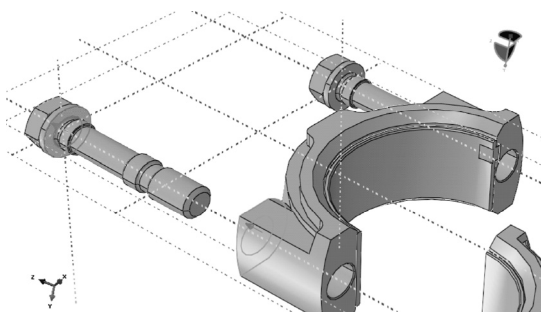
（11）单击按钮，拾取螺栓，单击中键，弹出图 3-88 所示的“线性阵列”对话框，输入第一个方向个数为“2”，偏移距离为“84”，第二个方向个数为“1”，单击“确定”按钮完成阵列，如图 3-89 所示。

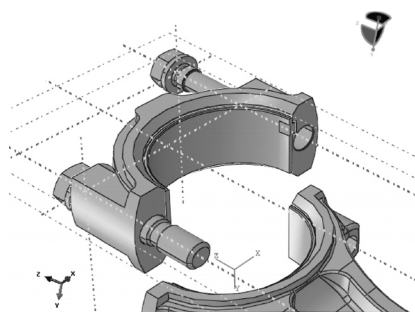
（12）参考第 10 步操作，为阵列生成的另一个螺栓施加圆柱约束。然后单击按钮，选择螺栓与连杆盖的端面（见图 3-90），注意箭头方向，单击中键完成约束，如图 3-91 所示。



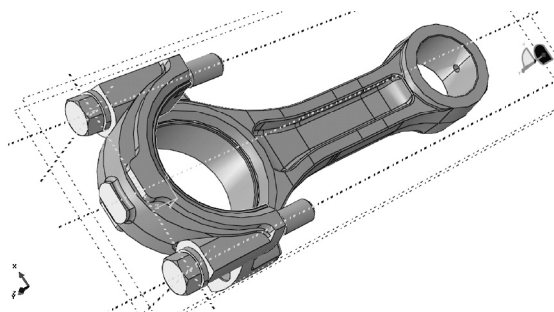
图 3-88 “线性阵列”对话框


图 3-89 阵列

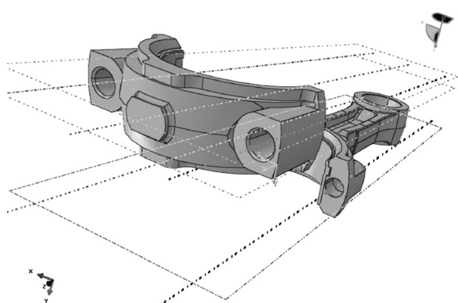

图 3-90 约束面

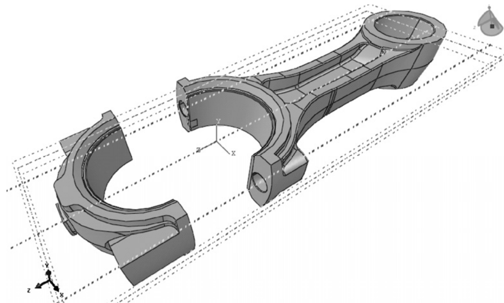

图 3-91 约束螺栓

（13）参考第 12 步操作，完成另一个螺栓的端面约束，如图 3-92 所示。


图 3-92 完成约束螺栓

（14）在模型树中，按住〈Ctrl〉键选择实例下的两 BOLT 实例，单击右键，选择“隐藏”。单击按钮，拾取连杆盖的孔的轴线与连杆体的孔轴线（见图 3-93），注意箭头方向，单击中键完成约束，如图 3-94 所示。


图 3-93 拾取轴线


图 3-94 对齐轴线

（15）单击按钮，选择图 3-95 所示的两个面平行，注意箭头方向。单击按钮，选择图 3-96 所示的端面，完成约束。

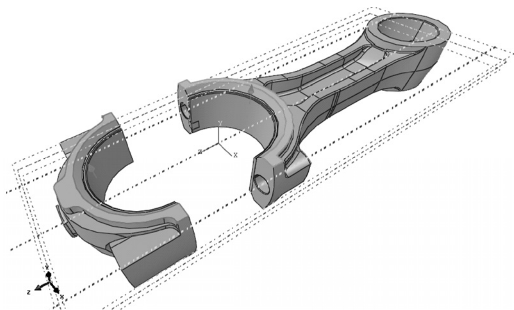


图 3-95　约束角度

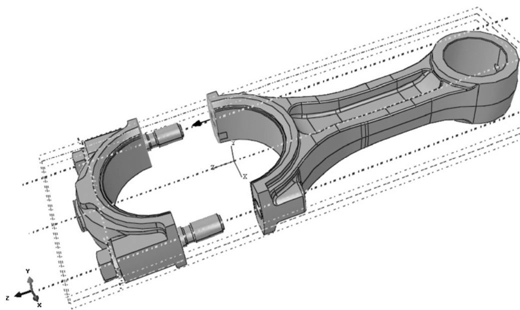


图 3-96　约束端面

（16）参考上述操作，打开“创建实例”对话框，如图 3-97 所示，完成衬套的实例化，如图 3-98 所示。



图 3-97　“创建实例”对话框

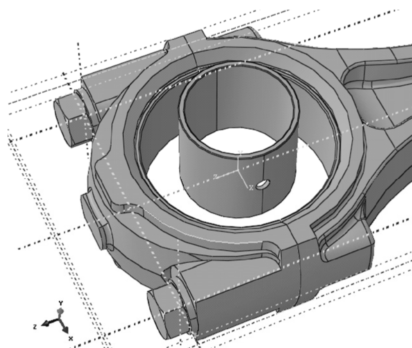


图 3-98　衬套实例化

（17）单击按钮，拾取衬套小孔的轴线与连杆体小孔的轴线，如图 3-99 所示，单击中键完成；再次单击按钮，约束衬套与活塞端轴孔。

至此完成了整套连杆组件的装配，如图 3-100 所示。

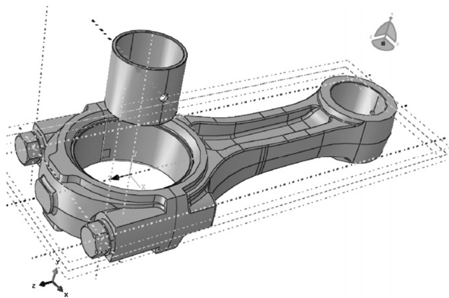


图 3-99　约束轴线

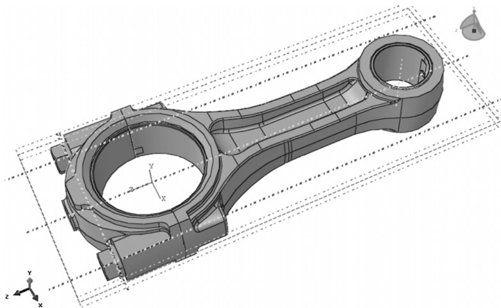


图 3-100　连杆组件

3.4 本章小结

本章为读者讲解了如何在 ABAQUS 中建立分析模型。

ABAQUS 的所有功能都集成在各功能模块中，用户根据需要在 ABAQUS/CAE 主界面中激活各功能模块，对应的菜单和工具栏随即出现在界面中。

ABAQUS 的模型是基于 CAD 软件中的部件和组装的概念建立起来的，了解 CAD 建模的用户应当较为熟悉。ABAQUS 的模型包括一个或多个部件，所有部件都在部件（Part）模块中建立，部件的草图在草图（Sketch）模块中创建，各部件在装配（Assembly）模块中进行组装，“属性”（Property）模块用于定义材料属性和截面特性。

读者应注意的是，模型切不可一味追求精致的细节，在保证可接受精度的条件下，越简单的模型越好。



第4章　分　析　步

分析步（STEP）可以帮助用户在分析过程中合理地规划整个加载过程。在分析步中，可以预先设定加载的步骤，所有的相互作用（接触、弹簧等）、载荷及边界条件均必须在分析步的框架下进行设置。在每个分析步中还要提出相应的输出请求，以规划最终结果文件，不致出现过于庞大而冗余的结果。

本章学习目标

- 掌握 ABAQUS 分析步模块的使用方法
- 掌握 ABAQUS 分析步的概念
- 掌握 ABAQUS 输出请求的设置方法
- 了解 ABAQUS 自适应网格技术

4.1　分析步

“分析步”（STEP）模块主要用于分析步的输出请求的设置，也可以进行求解控制与自适应网格划分。这些功能包含在菜单栏中的“分析步”“输出”及“其他”菜单中。在定义相互作用、载荷及边界条件之前，需要创建分析步；选择在初始步还是在分析步中设置接触或边界条件，载荷则只能在分析步中设置。

4.1.1　准备模型

正式进入分析步内容之前需要做一些准备工作，读者在此可温习上一章的内容。启动 ABAQUS/CAE，单击按钮，打开本节示例文件夹中的“ex4.1.cae”文件，这个模型数据库中包含了图 4-1 所示的 Rod 以及图 4-2 所示的 RodUpside 两个部件。

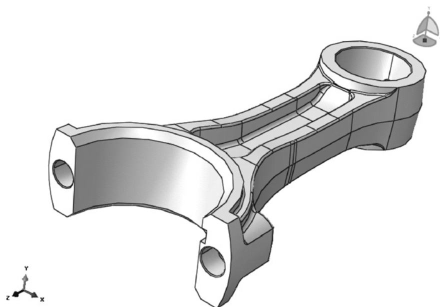


图 4-1　部件 Rod

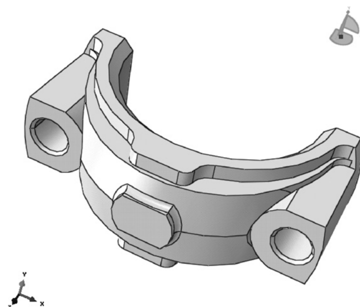


图 4-2　部件 RodUpside

进入属性模块，单击按钮，弹出图 4-3 所示的“编辑材料”对话框，输入材料名称为“GB40Cr”，用户可以选择是否输入材料的描述。

选择“通用”选项下的“密度”选项，如图 4-4 所示，定义质量密度为“7850”。

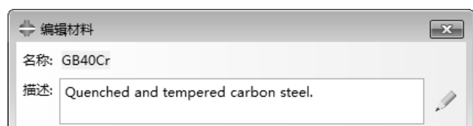


图 4-3 “编辑材料”对话框



图 4-4 密度

选择“力学”选项下的“弹性”选项，选择类型为“各向同性”，定义杨氏模量与泊松比（见图 4-5）。单击按钮，弹出图 4-6 所示的“创建截面”对话框，选择实体均质截面。

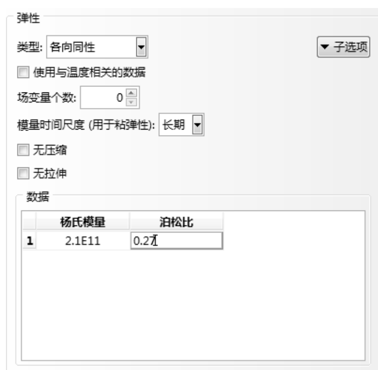


图 4-5 弹性材料参数



图 4-6 “创建截面”对话框

单击“继续”按钮，弹出“编辑截面”对话框，选择上一步定义的 GB40Cr 材料，单击“确定”按钮完成截面的创建。

进入装配模块，单击按钮，将部件 Rod 与 RodUpside 实例化，如图 4-7 所示。

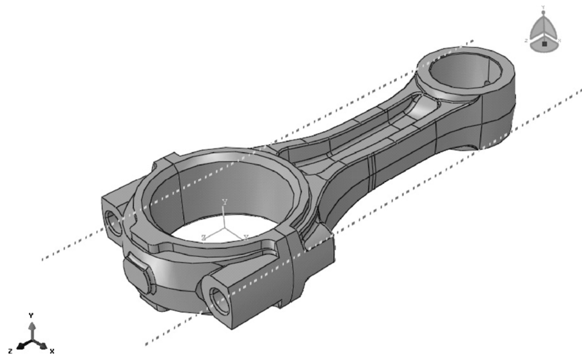


图 4-7 实例化

选择菜单栏中的“实例”菜单下的“合并/切削”命令，弹出图 4-8 所示的“合并/切削实体”对话框，输入新的部件名称，选择运算方法为“合并几何”，禁用原始部件，删除几何边界，单击“继续”按钮，按住〈Shift〉键拾取两个部件，单击中键完成部件合并，如图 4-9 所示。



图 4-8 “合并/切削实体”对话框

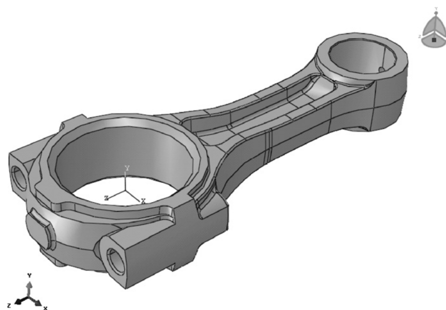


图 4-9　合并部件

回到属性模块，双击合并生成的 RodMerged 部件，在视图区中打开，如图 4-10 所示。单击按钮，拾取视图区中的部件，单击中键，弹出图 4-11 所示的“编辑截面指派”对话框，选择 SolidSteel 截面，单击“确定”按钮完成截面的指派。

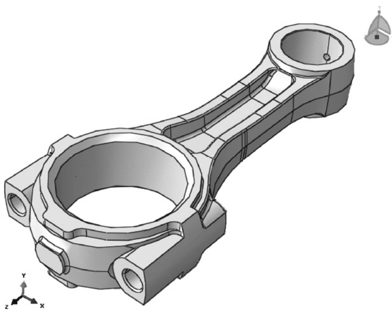


图 4-10　RodMerged 部件



图 4-11 “编辑截面指派”对话框

此时完成分析步前的准备工作。

4.1.2 通用静力学分析步

在环境栏中选择分析模块，进入分析步的定义。

单击（创建分析步）按钮，弹出图 4-12 所示的“创建分析步”对话框，用户可以在此输入分析步的名称，选择分析的类型，在此选择“静力，通用”，单击“继续”按钮弹出图 4-13 所示的“编辑分析步”对话框。

在图 4-13 所示的“编辑分析步”对话框有 3 个选项卡。“基本信息”选项卡中，用户可以定义分析步是否打开大位移非线性开关、指定自动稳定方式以及选择是否产生热效应。



图 4-12 “创建分析步”对话框



图 4-13 “编辑分析步”对话框

- 描述：用户自定义的对本分析步折描述，进入可视化后可以显示在状态区，非必须。
- 时间长度：输入分析步的时间长度，对于一般的静态分析，用户可以使用默认值，即“1”。
- 自动稳定：用于解决局部不稳定的问题（如局部屈曲、表面褶皱等），ABAQUS/Standard 会使用阻尼来使这个问题变得稳定。
- 几何非线性：用于选择是否考虑几何非线性（大变形问题）。ABAQUS/Standard 中默认为关闭。
- 包括绝热效应：用于绝热的应力分析，如高速加工过程。

图 4-14 所示的“增量”选项卡中，用户可以定义时间增量的增长方式。

- 类型：默认为自动，ABAQUS/Standard 根据计算效率自行选择时间增量。选择“固定”选项时，ABAQUS/Standard 根据用户定义的时间增量进行运算，在确保所有的时间增量都能收敛的情况下，可以使用此选项。
- 最大增量步数：用于设置该分析步的增量步数的上限，默认为 100，即使分析没有完成。当增量步数目达到上限时，分析也会停止。
- 增量步大小：用于设置时间增量的大小，当选择自动时，用户可以设置时间增量的初始值、最大值以及最小值。

图 4-15 所示为“其他”选项卡。用户可以在此定义方程的求解方式等，详细控制计算过程。

- 方程求解器：用于选择求解器与矩阵的存储方式，详见表 4-1。

表 4-1 方程求解器选项

参　数	功　能
直接	直接稀疏矩阵求解器，默认选项，适用于大多数情况
迭代	用于选择域分解的线性迭代求解器，对于大规模模型，分析速度大于直接求解器
使用求解器的默认设置	由 ABAQUS/Standard 自行选择对称或不对称的刚度矩阵存储方式，仅适用于直接稀疏矩阵求解器
非对称	不对称的刚度矩阵存储方式，仅适用于直接稀疏矩阵求解器
对称	对称的刚度矩阵存储方式，适用于直接稀疏矩阵求解器与迭代求解器

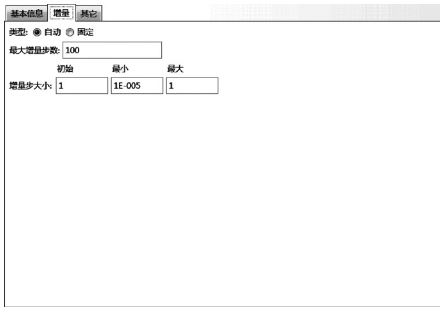


图 4-14　增量选项卡

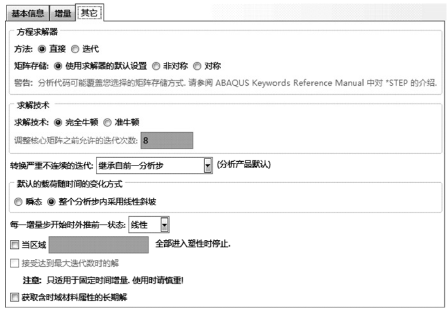


图 4-15　其他选项卡

● 求解技术：用于选择非线性平衡方程组的求解方式，详见表 4-2。

表 4-2　求解技术选项

参　数	功　能
完全牛顿	完全牛顿法，默认选项，适用于大多数情况
准牛顿	准牛顿法，当方程的雅各比矩阵是对称的且在迭代过程中变化不大时，采用该法可加快收敛。如选择此法，用户需要设置调整核心矩阵之前允许的迭代次数，默认为 8，最大为 25

● 转换严重不连续的迭代：用于选择非线性分析中高度不连续迭代的处理方式，详见表 4-3。

表 4-3　转换严重不连续的迭代

参　数	功　能
继承自前一分析步	默认选项，若出现高度不连续迭代，采用前一个通用分析步的值
关	若出现高度不连续迭代，开始一个新的迭代
开	若出现高度不连续迭代，程序估计高度不连续相关的残余载荷并检查平衡容差，判断是否开始另一个迭代或减小时间增量

● 默认的载荷随时间变化的方式：选择载荷与时间的关系，详见表 4-4。

表 4-4　默认的载荷随时间变化的方式

参　数	功　能
瞬态	瞬态施加，在整个分析步中保持不变
整个分析步内采用线性斜坡	分析步内线性增加

● 每一增量步开始时外推前一状态：选择每一增量步开始时外推前一状态，ABAQUS/Standard 中采用外推法加速非线性分析的收敛，详见表 4-5。

表 4-5　每一增量步开始时外推前一状态

参　数	功　能
无	不使用外推法
线性	默认选项，在开始一个增量步前外推前一个增量步的解答，第一个增量步不外推
抛物线	二次的，在开始一个增量步前外推两个增量步的解答，第一个增量步不外推，第二个增量步采用线性外推法

- 当指定区域全部进入塑性时停止：当指定区域内所有计算点的解答是完全塑性的，该分析步结束。
- 接受达到最大迭代数时的解：当增量选项卡中选择固定时，增量步达到设置的上限时，此结果被接受，用户应慎选此项。
- 获取含时域材料属性的长期解：该选项适用于粘弹性或粘塑性材料。

ABAQUS 在分析步中会自行创建一个名为“Initial”的初始分析步，ABAQUS/CAE 只会为模型创建一个初始步，它不能被改名、编辑、替换、复制或删除。初始分析步允许用户在分析在开始的时候定义边界条件、预定义字段和相互作用。

除了静力学分析步，ABAQUS 包括了 14 种通用分析步，详见表 4-6。

表 4-6　通用分析步

名　称	功　能
温度-位移耦合	该选项用于热－力耦合分析，当应力分布和温度分布互相影响时（如金属加工问题），需要采用该类分析步，适用于 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit。所选用的单元应该同时具有温度和位移自由度
Coupled thermal-electric-structural	该选项用于线性或非线性的热－电耦合分析，仅适用于 ABAQUS/Standard
直接循环	准静态分析过程，采用傅里叶级数与非线性材料的时间积分，以求解结构疲劳响应，用于结构低周疲劳分析等
动力，隐式	该选项用于线性或非线性的隐式动力学分析，非线性动态响应只能采用该类分析步，仅适用于 ABAQUS/Standard
动力，显式	该选项用于显式动力学分析，对于大模型的瞬时动力学分析和高度不连续事件的分析特别有效，仅适用于 ABAQUS/Explicit
动力，位移-温度，显式	该选项用于显式动态温度－位移耦合分析，类似于热－力耦合分析，仅适用于 ABAQUS/Explicit，且包含惯性效应和瞬时热响应
地应力	该选项用于线性或非线性的地压应力场分析，仅适用于 ABAQUS/Standard，其后往往跟随多孔流体扩散－应力耦合分析或静力学分析
热传递	该选项用于传热分析，不考虑热－力耦合与热－电耦合，仅适用于 ABAQUS/Standard
质量扩散	该选项用于质量扩散分析（瞬态或稳态），仅适用于 ABAQUS/Standard
土	该选项用于土壤力学分析，仅适用于 ABAQUS/Standard
静态，通用	该选项用于线性或非线性静力学分析，不考虑惯性及与时间相关的材料属性，仅适用于 ABAQUS/Standard
静态，Ricks	该选项通常用于处理不稳定的几何非线性问题（采用 Riks 方法），仅适用于 ABAQUS/Standard
粘性	该选项用于与时间相关材料（如粘弹性、粘塑性和蠕变）的线性或非线性响应分析，属于准静态分析，惯性效应被忽略，仅适用于 ABAQUS/Standard
退火	该选项用于模拟金属材料的退火过程，与时间无关，为瞬时过程，适用于金属材料和用户自定义材料。该类分析步仅适用于 ABAQUS/Explicit，且当 Dynamic，Explicit 或 Dynamic，Temp-disp，Explicit 分析步创建后才出现

4.1.3 通用隐式动力学分析步

单击按钮，弹出图 4-16 所示的“创建分析步”对话框，输入本分析步的名称，选择“动力，隐式”，单击“继续”，弹出图 4-17 所示的“编辑分析步”对话框。

图 4-17 所示的为“编辑分析步”对话框的“基本信息”选项卡与通用静态分析步一样，也有“基本信息”“增量”“其他”三个选项卡，大量选项是相同的，在此介绍与通用静态分析步不同的选项。



图 4-16 “创建分析步”对话框 1



图 4-17 “编辑分析步”对话框 2

在“增量”选项卡中，当“选择自动时间增量”时，用户可以设置 Half-step residual（增量步中的平衡残余误差的容差）；当“选择固定时间增量”时，用户可以选择 Suppress half-step residual 来加快收敛。

“其他”选项卡页面的参数说明如下。

- 求解技术中不包括接触迭代方法。
- 载荷随时间的变化方式的默认选项为瞬态。
- 分析步开始时的初始加速度的计算：该选项适用于分析步开始时载荷不突然变化的情况，ABAQUS/Standard 在分析步开始时不计算初始加速度。若当前分析步是第一个动力学分析步，加速度为 0；若前一个分析步也是动力学分析步，采用前一个分析步结束时的加速度作为新的分析步的加速度。在默认情况下，ABAQUS/Standard 计算初始加速度。

4.1.4 通用显式动力学分析步

单击按钮，弹出图 4-18 所示的“创建分析步”对话框，输入本分析步的名称，选择“动力，显式”，单击“继续”按钮弹出图 4-19 所示的“编辑分析步”对话框。



图 4-18 “创建分析步”对话框 2



图 4-19 “编辑分析步”对话框 2

该分析步用于显式动力学分析，除了“基本信息”“增量”和“其他”三个选项卡页面外，其“编辑分析步”对话框还包括一个“质量缩放”选项卡页面。“基本信息”选项卡页面中的几何非线性选项默认为“开”。“增量”选项卡页面的相关参数如表 4-7 所示。

表 4-7 增量选项卡

参　　数	功　　能
稳定增量步估计	该栏用于选择时间增量的稳定极限的估算方法，总是以单元-by-单元方式开始，在一定条件下转化为全局方式
全局	此为默认选项，用于估算整个模型使用当前膨胀波速的最高频率。当采用该方法具有足够的精确度时，才由单元-by-单元方式转化为全局方式。若模型包含流体单元、无限元、阻尼器、厚壳、厚梁、材料阻尼及自适应网格等，该方法不被使用。若使用该方法耗费太多的计算时间，ABAQUS/Explicit 采用单元-by-单元方法
单元-by-单元	用于估算每个单元的最高频率，该方法是保守的，得到的稳定时间增量总是小于整体估算法
最大时间增量步——无限制	此为默认选项，不限制时间增量的上限
最大时间增量步——值	该选项用于设置时间增量的上限
时间缩放系数	该栏用于输入时间增量比例因子，用于调整 ABAQUS/Explicit 计算出的稳定的时间增量，默认值为 1。不适用于用户选择固定时间增量中的用户自定义时间增量的情况

“质量缩放”选项卡页面用于质量缩放的定义。当模型的某些区域包含控制稳定极限的很小的单元时，ABAQUS/Explicit 采用质量缩放功能来增加稳定极限，提高分析效率。

- 使用前一分析步的缩放质量的“整个分析步”定义 from the previous step：此为默认选项，程序采用前一个分析步对质量缩放的定义。
- 使用下面的缩放定义：该选项用于创建一个或多个质量缩放定义。单击该对话框下部的“创建”按钮，弹出“编辑质量缩放”对话框，如图 4-20 所示，用户在该对话框内选择质量缩放的类型并进行相应的设置。设置完成后，“编辑分析步”对话框的数据列表内将显示出该质量缩放的设置，用户可以单击该对话框下部的“编辑”或“删除”按钮进行质量缩放定义的编辑或删除。关于“编辑质量缩放”对话框的使用，请读者参阅系统相关帮助文件。



图 4-20 “编辑质量缩放”对话框

“其他”选项卡页面不同于“静态，通用”和“动力，隐式”的情况，该页面仅包含“线性体积粘性参数”和“二次体积粘性参数”两栏。

- 线性体积粘性参数：该栏用于输入线性体积粘度参数，默认值为“0.06”，ABAQUS/Explicit 默认使用该类参数。
- 二次体积粘性参数：该栏用于输入二次体积粘度参数，默认值为“1.2”，仅适用于连续实体单元和压容积应变率时。

4.1.5 线性摄动分析步

线性摄动分析步（Linear perturbation analysis steps）仅适用于 ABAQUS/Standard 中的线性分析。ABAQUS 包括 11 种线性摄动分析步，如表 4-8 所示。

表 4-8 线性摄动分析步

名　称	功能说明
屈曲	该选项用于线性特征值屈曲分析
频率	通过特征值的提取计算固有频率和相应的振型，用户可以选用 Lanczos 特征值求解器、AMS 特征值求解器和子空间迭代特征值求解器
静力，线性摄动	该选项用于线性静态应力/位移分析
稳态动力学，直接	该选项用于稳态谐波响应分析，直接求解模型在谐波激励下的稳态动力学线性响应
子结构生成	用于生成子结构，适用于模型复杂庞大但有结构上的重复性时
复数频率	创建了 Frequency 分析步后才出现，综合特征值提取
模态动力学	创建了 Frequency 分析步后才出现，瞬时模态动力学分析
随机响应	创建了 Frequency 分析步后才出现，随机响应分析
响应谱	创建了 Frequency 分析步后才出现，响应谱分析
稳态动力学，模态	创建了 Frequency 分析步后才出现，基于模态的稳态动力学分析
稳态动力学，子空间	创建了 Frequency 分析步后才出现，基于子空间的稳态动力学分析

图 4-21 所示为“创建分析步”对话框，单击“继续”按钮弹出图 4-22 所示的“编辑分析步”对话框。



图 4-21 “创建分析步”对话框



图 4-22 “编辑分析步”对话框

“编辑分析步”对话框仅包含“基本信息”和“其他”两个选项卡页面，且选项为“静力，线性摄动”的子集。

- “基本信息”选项卡页面：仅包含描述栏。“几何非线性”为“关”，即不涉及几何非线性问题。
- “其他”选项卡页面：仅包含方程求解器栏。

系统相关帮助文件对分析步均有详细介绍。ABAQUS 对分析步的数量没有限制，但严格限制其排列顺序。当继续创建分析步时，“创建分析步”对话框的分析步列表将自动更新，仅列出可以选用的分析步。

4.2 输出设置

用户可以设置写入输出数据库的变量，包括场变量（以较低的频率将整个模型或模型的大部分区域的结果写入输出数据库）和历史变量（以较高的频率将模型的小部分区域的结果写入输出数据库）。

4.2.1 输出请求管理器

创建了分析步后，ABAQUS/CAE 会自动创建默认的场变量输出要求和历史变量输出要求（线性摄动分析步中的屈曲、频率和复频率无历史变量输出）。

单击工具区中的工具右侧的工具和工具右侧的工具，分别弹出“场输出请求管理器”对话框和“历程输出请求管理器”对话框。

如图 4-23 所示为“场输出要求管理器”对话框，“历程输出要求管理器”对话框的布局与之完全相同。接下来只介绍“场输出请求管理器”对话框，“历程输出请求管理器”对话框的使用与之相同。



图 4-23 “场输出请求管理器”对话框

4.2.2 编辑输出请求

选择分析步“Static”，单击“编辑”按钮，弹出图 4-24 所示的“编辑场输出请求”对话框，在图 4-25 所示的“输出变量”选项组内，可以勾选需要输出的变量，例如应力的各分量等。

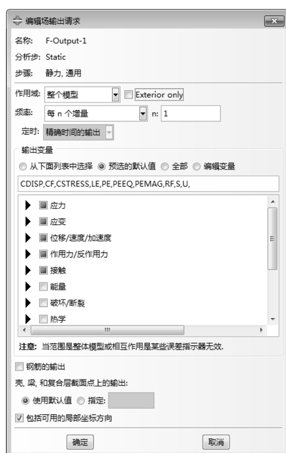


图 4-24 “编辑场输出请求”对话框

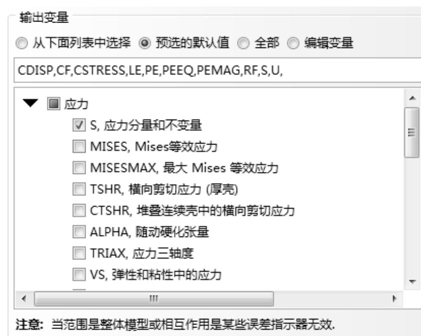


图 4-25 输出变量

对话框中其他选项组的功能介绍如下。

- 作用域：该列表用于选择输出变量的区域，详见表 4-9。

表 4-9 输出请求的作用域

参 数	功 能
整个模型	此为默认选项，将整个模型的场变量写入输出数据库
集	将指定集合的场变量写入输出数据库
螺栓载荷	将指定的螺栓载荷的场变量写入输出数据库
相互作用	将指定的面－面接触或自接触的场变量写入输出数据库

- 频率：该栏用于设置输出变量的频率，详见表 4-10。

表 4-10 输出请求的频率

参 数	功 能
末尾增量步	将最后一个增量步的场变量写入输出数据库
每 n 个增量	此为默认选项，每隔指定数量的增量步 ABAQUS 将场变量写入输出数据库，默认值为 1。此时，ABAQUS 也会将最后一个增量步的场变量写入输出数据库
均匀时间间隔	用户指定时间间隔的数目，ABAQUS 以此数目将时间平均分割并将场变量写入输出数据库
每 x 个时间单位	每隔指定的时间长度 ABAQUS 将场变量写入输出数据库
来自时间点	ABAQUS 根据时间点集合将场变量写入输出数据库

- 定时：当在频率列表中选择均匀时间间隔、每 x 个时间单位或来自时间点时，该列表为可选，包括精确时间的输出和近似时间的输出。
- 输出变量：该栏用于选择写入输出数据库的场变量，可通过 4 种方式进行选择：从下面列表中选择、预选的默认值、全部、编辑变量。输出变量列表与输出变量的区域选择相对应。这是用户需要重点选择的部分，写入输出数据库的场变量越多，输出数据库占的计算机空间也相应地增大，所以用户应该根据需要选择输出变量。
- 钢筋的输出：该选项用于选择写入输出数据库的场变量中是否包括钢筋的结果，作用域为整个模型或集时被激活。
- 壳、梁和复合层截面点上的输出：该栏用于设置写入输出数据库的场变量的截面点，作用域为整个模型或集时被激活。
- 包括可用的局部坐标方向：不选择该项可以减小输出数据库，默认为选择该项。

4.3 分析步模块的其他功能

分析步模块除了能够设置分析步和定义输出变量外，还能通过输出菜单和其他菜单进行其他操作，下面简单进行介绍。

4.3.1 ALE 自适应网格

ALE 自适应网格（ALE adaptive meshing ）是任意拉格朗日-欧拉（Arbitrary Lagrangian-Eulerian）分析，它结合了拉格朗日分析和欧拉分析的特征，在整个分析中保持高质量的网格而不改变网格的拓扑结构。

ALE 自适应网格适用于静力学分析（Static，General）、热-力耦合分析（Coupled temp-displacement）、显式动力学分析（Dynamic，Explicit）、显式动态温度-位移耦合分析

（Dynamic，Temp-disp，Explicit）和土力学分析（Soils）。

主菜单中的“其他”下有三个子菜单用于 ALE 自适应网格：“其他→ALE 自适应网格区域”菜单用于指定模型中 ALE 自适应网格的区域，一个分析步只能指定一个区域；“其他→ALE 自适应网格约束”菜单用于指定 ALE 自适应网格的约束；“其他→ALE 自适应网格控制”菜单用于指定 ALE 自适应网格的控制。

读者若想进一步了解 ALE 自适应网格，请参阅系统相关帮助文件。

4.3.2 求解控制

用户可以通过调整参数来控制 ABAQUS 的分析，包括通用求解控制和线性方程组迭代求解器的控制。“其他→通用求解器控制”菜单用于通用求解控制，仅适用于 ABAQUS/Standard 的通用分析步，用户通过调整变量来控制收敛和时间积分的精确性。详见系统相关帮助文件。

“其他→求解器控制”菜单用于线性方程组迭代求解器的控制，适用于通用静力学分析（静态，通用）、线性摄动静力学分析（静态，线性摄动）、粘性分析和传热分析。详见系统相关帮助文件。

读者要慎用通用求解控制。因为通用求解控制的默认设置适用于大多数分析，改变默认设置可能增加计算时间、产生不精确的解或导致收敛问题。

在分析步模块中，用户除了能设置场变量输出要求和历史变量输出要求外，还能进行特殊的输出控制，这些功能都包含在输出菜单中，详见系统相关帮助文件。

4.4 本章小结

本章为读者介绍了 ABAQUS/CAE 的分析步模块。在分析步模块中用户可以定义不同的分析步类型、规划加载方案以及定义输出要求。

在分析步中，还可以进行 ALE 自适应网格分析，并对求解器进行更高级的控制。但在此再一次强调，通用求解器的设置是适用于大多数分析情况的；如果对力学知识、数值分析、案例相关专业知识有深入的理解，可以对其进行更为优化的调整；建议采用原有的默认选项，否则可能出现意料之外的错误。

在此也鼓励读者深入学习相关专业知识，才能不拘泥于程序本身，更为深入地开发出 ABAQUS 应用的潜力。



第 5 章　相 互 作 用

选择模块列表中的“相互作用”，进入相互作用功能模块（Interaction）。此模块主要用于定义装配件各部分之间的相互作用、约束和连接器，故在进入该模块之前，用户需要在装配功能模块中创建装配件并完成各部件实体的定位。

用户可以通过主菜单中的“相互作用”菜单或工具区内相应的工具定义接触、弹性基础、热传导、热辐射、入射波、声阻和传动/传感，通过约束菜单或工具区内相应的工具定义绑定约束、刚体约束、显示体约束、耦合约束、壳－实体耦合约束、嵌入区域约束和方程约束，通过连接器菜单或工具区内相应的工具定义各种连接器，通过特殊菜单定义惯量、裂纹和弹簧/阻尼器。

本章学习目标

- 掌握 ABAQUS 相互作用模块的使用方法
- 掌握 ABAQUS 相互作用的概念
- 掌握 ABAQUS 中相互作用属性的概念
- 掌握 ABAQUS 中约束的概念
- 掌握 ABAQUS 中连接器的概念

5.1　相互作用

在定义一些相互作用之前，需要定义对应的相互作用属性，包括接触、热传导、入射波、声阻和传动/传感。

接下来将结合实例详细介绍，本书未涉及的相互作用用户可以查询相关帮助文件。

5.1.1 接触属性

启动 ABAQUS/CAE，打开本节示例文件夹中的 ex5.1.cae 模型数据库，数据库中有如图 5-1 所示的已完成装配的三个部件。

进入相互作用模块，单击按钮，弹出图 5-2 所示的“创建相互作用属性”对话框，该对话框包括两个部分：

- 名称：在该栏内输入相互作用属性的名称，默认为 IntProp-n（n 表示第 n 个创建的相互作用属性）。
- 类型：该列表用于选择相互作用属性的类型，包括接触、膜条件、空腔辐射、Fluid cavity（流体腔）、Fluid exchange（流体交换）、声学阻抗、入射波和激励器/传感器。

选择“通用接触”，单击“继续”，弹出图 5-3 所示的“编辑接触属性”对话框。

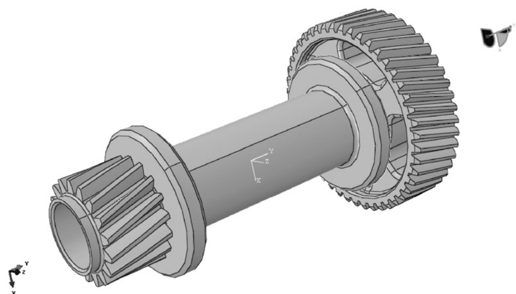


图 5-1　齿轮轴模型



图 5-2　创建相互作用



图 5-3　编辑接触属性

该对话框与定义材料属性的编辑材料对话框类似，包括接触属性选项列表和各种接触参数的设置区域，下面分别进行介绍。

■ **接触属性选项**

该选项组用于选择接触属性的类型，选择的接触属性会依次出现在列表中。其中包括三个下拉菜单。

力学

- 切向行为（Tangential Behavior）：选择定义摩擦系数、剪应力极限和弹性滑动等摩擦属性。
- 法向行为（Normal Behavior）：选择定义接触刚度等法向接触属性。
- 阻尼（Damping）：选择定义对接触面相对运动的阻尼。
- 损伤（Damage）：定义接触损伤模型。
- 断裂准则（Fracture criterion）：定义裂纹生长方向等参数。
- 粘性行为（Visco）：定义两个接触面之前的粘连、牵引等行为。
- 几何属性（Geometric Properties）：选择定义附加的几何属性。

热学

- 热传导（Thermal Conductance）：选择定义接触面间的热传导率。
- 生热（Heat Generation）：选择定义由接触面的相互作用导致生热的能量损耗分数，适用于热－力耦合分析（Coupled temperature-displacement）或热－电耦合分析（Coupled thermal-electrical）。



● 热辐射（Radiation）：选择定义邻近的接触面间的热辐射属性。

电

● 电导系数（Conductance）：设置接触面之间的电导系数，可以产生热。

■ **数据区（Data field）**

出现在 Contact Property Options 的下方，在该选项组内设置相应的接触属性值。这里主要介绍力学分析中常用的切向行为（Tangential Behavior）和法向行为（Normal Behavior），其他类型的接触属性请读者参见系统帮助文件。

切向行为（Tangential Behavior）

主要设置摩擦公式（Friction formulation），共有 6 个选项。

● 无摩擦（Frictionless）：此为默认选项，用于定义无摩擦的接触面。

● 罚（Penalty）：该选项用于定义罚函数摩擦公式，包含 3 个页面。

✧ 摩擦（Friction）：主要用于定义摩擦系数。

● Directionality（方向性）：该栏用于选择摩擦的方向，有“各向同性”和“各向异性”两个选项。各向同性（Isotropic），仅输入一个统一的摩擦系数，为默认选项；各向异性（Anisotropic），需要设定两个正交方向的摩擦系数，仅适用于 ABAQUS/Standard。

● 使用基于滑动率的数据（Use slip-rate-dependent data）：勾选该选项表示摩擦系数与滑动速度相关，在数据表中出现 Slip Rate 栏。

● 使用依赖接触压力的数据（Use contact-pressure-dependent data）：勾选该选项表示摩擦系数与接触压力相关，在数据表中出现 Contact Pressure 栏。

● 使用与温度相关的数据（Use temperature-dependent data）：勾选该选项表示摩擦系数与温度相关，在数据表中出现 Temp 栏。

● 场变量个数（Number of field variables）：该选项用于设置与摩擦系数相关的场变量的数目，在数据表中出现场 1、场 2……场 n 栏（n 为场变量的数目），默认值为 0。

对话框下部的数据表用于设置摩擦系数及相关参数。

✧ 剪应力（Shear Stress）：用于设置对剪应力的限制。

无限制（No limit）：此为默认选项，在滑动前，不限制接触面的剪应力。

指定（Specify）：该选项用于指定剪应力极限，当剪应力达到该极限值时，开始滑动。

✧ 弹性滑动（Elastic Slip）：分别设置 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 中的弹性滑动。

● 指定最大弹性滑移（Specify maximum elastic slip）：用于设置最大弹性滑动距离，仅适用于 ABAQUS/Standard，包括表面特征尺寸百分比和绝对距离两个单选项。表面特征尺寸百分比（Fraction of characteristic surface dimension）为默认选项，以特征接触面长度的最小分数作为允许的最大弹性滑动，默认值为 0.005；绝对距离（Absolute distance）是直接输入允许的最大弹性滑动距离。

● 弹性滑动刚度（Elastic slip stiffness）：用于设置弹性滑动刚度，仅适用于 ABAQUS/Explicit，包括无限（无滑移）和指定两个单选项。无限（无滑移）（Infinite(no slip)）为默认选项，指定无弹性滑动；指定（Specify）选项用来指定剪应力与弹性滑动关系曲线的斜率。

- 静摩擦—动摩擦指数衰减（Static-Kinetic Exponential Decay）：该选项用于指定静/动摩擦系数和弹性滑动，包含两个界面。

✧ 摩擦（Friction）：主要用于设置静摩擦系数和动摩擦系数的指数衰减关系，包括两种方式。

- 系数（Coefficients）：直接指定静摩擦系数、极限滑动速度下的动摩擦系数和衰减系数来定义静摩擦系数和动摩擦系数的指数衰减关系。
- 试验数据（Test data）：设置静摩擦系数、指定滑动速度和对应的动摩擦系数、极限滑动速度下的动摩擦系数。

弹性滑动（Elastic Slip）：与罚函数（Penalty）的选项完全相同。

- 粗糙（Rough）：该选项用于定义无限大的摩擦系数，一旦接触，则不发生相对滑动。
- 拉格朗日乘子（Lagrange Multiplier）：使用拉格朗日乘子来加强接触面的粘性约束，仅适用于 ABAQUS/Standard。该摩擦公式的设置包含两个界面，摩擦（Friction）和剪应力（Shear Stress），界面设置与罚函数（Penalty）完全相同。
- 用户定义（User-defined）：该选项用于选择用户子程序 FRIC（ABAQUS/Standard）或 VFRIC（ABAQUS/Explicit）进行分析。该对话框包含两个选项。

✧ 状态相关变量的个数（Number of state-dependent variables）：用于指定与输入相关的状态变量的数量。

✧ 摩擦属性（Friction Properties）：该数据表用于输入用户子程序中需要的摩擦系数。

Normal Behavior（法向属性）

主要用于设置接触压力与过盈的关系。

✧ 约束执行方法（Constraint enforcement method）：该栏用于选择约束增强方法。

✧ Default：此为默认选项，采用接触压力与过盈的关系。此时，用户可以通过压力过盈（Pressure-Overclosure）栏选择硬接触和 4 种软接触，下面分别进行介绍。

- “硬”接触（“Hard”Contact）：在 ABAQUS/Standard 中采用拉格朗日乘子方法或在 ABAQUS/Explicit 中采用罚函数方法来加强接触约束。此时，有一个选项允许接触后分离（Allow separation after contact），默认选择该选项；若不选择该选项则表明一旦接触后，接触面不再分离。
- 指数（Exponential）：该选项用于指定接触压力与过盈的指数关系。用户需要在数据表中输入零间距时的接触压力值和零接触压力时的间距。另外，最大刚度（Maximum stiffness）栏可以设置模型的最大接触刚度，仅适用于 ABAQUS/Explicit；默认选项为无限制，表示在运动接触中最大接触刚度为无限大，在罚函数接触中最大接触刚度为默认罚函数刚度；若选择指定，则用户指定最大接触刚度。
- 线性（Linear）：该选项用于指定接触压力与过盈的线性关系。用户需要在接触刚度（Contact stiffness）栏输入接触刚度，即接触压力－过盈关系曲线的斜率，该值必须为正。
- 表（Tabular）：以表格形式指定分段线性的接触压力－过盈关系。用户需要在数据表中输入接触压力与对应的过盈量，接触压力和过盈量必须是单调递增的，且必须以零压力开始；当过盈量大于表中的最大过盈量时，接触压力－过盈关系以用户定义

的最后斜率外推。

- 标量因子（通用接触）（Scale Factor (General Contact)）：以缩放默认接触刚度的公式指定分段线性的接触压力－过盈关系，仅适用于 ABAQUS/Explicit 中的通用接触（General Contact）。用户需要在过盈（Overclosure）栏输入正值的过盈量，可以选择系数（factor，输入最小单元尺寸的分数）和度量（measure，直接输入过盈量）两种方式。用户还需要在接触刚度比例系数（Contact stiffness scale factor）栏输入大于 1 的默认接触刚度的放大因子，当过盈超过过盈栏中指定的过盈量时，接触刚度乘以该放大因子。另外，用户可以选择在初始刚度比例因子（Initial stiffness scale factor）栏输入初始刚度的比例因子，该比例因子必须大于 0，默认值为 1。
- 增广 Lagrange（Augmented Lagrange (Standard)）：采用增广拉格朗日方法，仅适用于 ABAQUS/Standard。此时，仅能选择"硬接触"（"Hard" Contact）。
- 允许接触后分离（Allow separation after contact）：默认选择该选项，接触后接触面可分离。若不选择该选项则表明一旦接触后，接触面不再分离。
- 接触刚度（Contact stiffness）：该栏用于指定接触刚度。默认选项为使用默认（Use default），ABAQUS 自动计算出罚函数接触刚度；用户可以选择指定，输入正值的接触刚度。
- 接触刚度的比例因子（Contact stiffness scale factor）：该栏用于输入接触刚度的比例因子，该比例因子必须大于 0，默认值为 1。
- 接触压力为零时的过盈（Clearance at which contact pressure is zero）：该栏用于输入接触压力为零时主面和从面的间距，默认值为 0。
- 罚（Penalty (Standard)）：采用罚函数方法，仅适用于 ABAQUS/Standard。此时，仅能选择硬接触（"Hard" Contact）。其界面设置与增广的拉格朗日方法（Augmented Lagrange）相同。

设置完成后，单击"确定"按钮。用户可以修改接触属性，方法为：单击工具区中的"创建相互作用"按钮右侧的"相互作用属性管理器"工具，选择需要编辑的接触属性，单击"编辑"按钮；或执行相互作用、属性、编辑命令后，在下级菜单中选择需要编辑的接触属性。

5.1.2 定义接触

在 ABAQUS/Standard 中，用户可以定义面－面接触和自接触；在 ABAQUS/Explicit 中，用户可以定义面－面接触、自接触和通用接触。之前设置的接触属性适用于所有的接触类型。

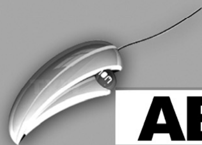
ABAQUS/Standard 中的面－面接触（Surface-to-surface contact (Standard)）

单击按钮，弹出图 5-4 所示的"创建相互作用"（Create Interaction）对话框。该对话框包括三个部分。

■ 名称（Name）：在该栏内输入相互作用的名称，默认为 Int-n（n 表示第 n 个创建的相互作用）。

■ 分析步（Step）：该栏用于选择激活相互作用的步骤，可以选择初始步或一个分析步。

■ 类型（Types for Selected Step）：该列表用于选择相互作用的类型。



选择分析步为 Static，单击“继续”按钮，按住〈Shift〉键拾取轴头的接触面如图 5-5 所示，单击中键，再拾取齿轮（Gear1）的接触面如图 5-6 所示。



图 5-4　创建相互作用

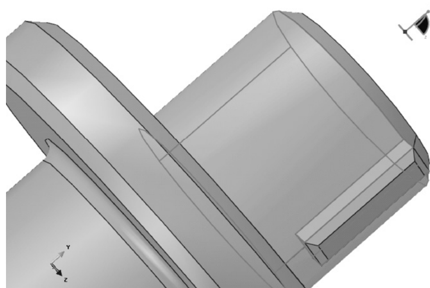


图 5-5　轴头接触表面

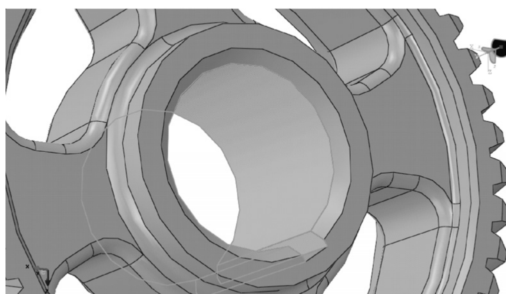


图 5-6　Gear1 轴孔接触面

单击中键，弹出图 5-7 所示的“编辑相互作用”对话框。该对话框包含如下内容。

- ■ “转换曲面”按钮：该按钮用于交换主面和从面，在选择从面（如图 5-5 中的轴头）时被激活。在视图区中，主面为红色，从面为紫红色。
- ■ 滑移公式（Sliding formulation）：该栏用于选择滑动公式。
- ● 有限滑移（Finite sliding）：用于选择有限滑移公式，允许接触面间的任意分离、滑动及旋转，此为默认选项。
- ● 小滑移（Small sliding）：用于选择小滑移公式，在整个分析中，接触面间的相对运动都较小。
- ■ 离散化方法（Constraint enforcement method）：该栏用于选择约束增强方法，即接触离散化。
- ● 结点-表面（Node to surface）：此为默认选项，从面被离散成结点，每个从面结点与其投影到主面上的结点发生相互作用，接触方向为主面的法向，每一个接触条件包含一个从面结点和一组投影的主面结点。该方法适用于两种从面类型。
- ● 表面-表面（Surface to surface）：该方法考虑了主面和从面的形状，提高了计算精确度，但要增加计算时间。该方法仅适用于从面。
- ■ 排除壳/膜厚度（Exclude shell/membrane element thickness）：该栏用于选择是否考虑

壳或膜的厚度。当滑移公式（Sliding formulation）栏为小滑移（Small sliding）或当滑移公式（Sliding formulation）栏为有限滑移（Finite sliding）且离散化方法（Constraint enforcement method）栏为表面-表面（Surface to surface）时，该选项被激活，用户可以选择是否考虑壳或膜的厚度。当滑移公式（Sliding formulation）栏为有限滑移（Finite sliding）且离散化方法（Constraint enforcement method）栏为结点-表面（Node to surface）时，ABAQUS 不考虑壳或膜的厚度。

■ 主表面平滑度（Degree of smoothing for master surface）：当滑移公式（Sliding formulation）栏为有限滑移（Finite sliding）时，用户可以在该栏输入主面边界长度的分数作为主面光滑参数，该值小于 0.5，默认值为 0.2。

■ 从结点/表面调整（Slave Node/Surface Adjustment）：该选项卡用于在计算开始时调整从结点/从面的位置。对从结点/从面位置的调整仅仅是对模型几何的调整，不产生应力/应变。

● 不调整（No adjustment）：此为默认选项，不调整从结点/从面的位置。

● 只为调整到删除过盈（Adjust only to remove overclosure）：仅调整被主面穿透的从面区域，将这些区域精确地移动到与主面接触的位置。

● 为调整区域指定容差（Specify tolerance for adjustment zone）：该选项用于指定一个调整区域。用户在该栏内输入一个距离值，从主面向外延伸该设定的距离为调整区域，ABAQUS/Standard 将调整区域内的从面精确地移动到与主面接触的位置。默认值为 0，此时的调整效果与只为调整到删除过盈（Adjust only to remove overclosure）选项相同，仅调整被主面穿透的从面区域。

● 调整下列集中的从结点（Adjust slave nodes in set）：ABAQUS/Standard 仅调整指定结点集内包含的从面结点，不管该结点与主面的距离多大，ABAQUS/Standard 将指定结点集内包含的从面结点精确地移动到与主面接触的位置。

● 绑定调整后的表面（Tie adjusted surfaces）：当用户选择调整从结点/从面的位置时被激活，表示在整个分析中将主面和从面绑定在一起，即定义一个绑定接触。一般情况下，建议读者采用绑定约束（Tie Constraint）代替绑定接触。

■ 过盈量（Clearance）：当选择小滑移公式（在滑移公式（Sliding formulation）选项选择“小滑移”（Small sliding））时，该选项卡用于指定主面和从面之间的初始间距或过盈，用户需要首先在初始空隙（Initial clearance）列表内选择间距类型，再按要求指定初始间距或过盈。

● 未指定（Not specified）：不指定初始间距。

● 整个从平面上的一致值（Uniform value across slave surface）：该选项用于指定主面和从面之间统一的间距或过盈，正值为间距，负值为过盈。

● 计算单线螺栓（Computed for single-threaded bolt）：该选项用于单个螺栓连接的螺纹模拟，初始间距或过盈由 ABAQUS/Standard 计算出。

✧ 从表面上的过盈区域（Clearance region on slave surface）：用户需要单击“Edit Region”按钮指定需要设置初始间距或穿透的从面结点区域，方法与定义接触时指定从面结点区域相同。

✧ 螺栓议程矢量（Bolt direction vector）：用户需要单击“编辑”按钮在视图区选择已创

建的轴作为螺栓/螺栓孔中心线的方向。

✧ 半线角（Half-thread angle）：该栏用于输入半螺纹断面角。

✧ 螺距（Pitch）：该栏用于输入螺距。

✧ 螺栓直径（Bolt diameter）：该栏用于输入螺纹的直径，用户可以选择“主要”定义螺纹大径，选择“平均”定义螺纹中径。

- 指定单线螺栓（Specify for single-threaded bolt）：该选项用于单个螺栓连接的接触分析，与计算单线螺栓（Computed for single-threaded bolt）的唯一区别是需要用户指定初始间距或过盈，正值为间距，负值为过盈。
- 接触作用属性（Contact interaction property）：该栏用于选择接触作用属性。若之前没有设置接触属性，可以单击按钮进行创建。
- 选项（Options）：单击“干涉调整”按钮，弹出“干涉调整选项”对话框，如图 5-8 所示，用于设置初始过盈。

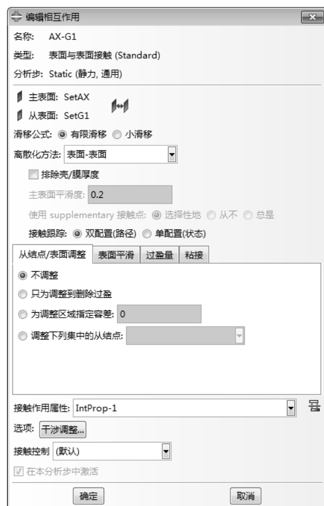


图 5-7　编辑相互作用



图 5-8 “干涉调整选项”对话框

- 接触控制（Contact controls）：该栏用于选择已建立的接触控制。

ABAQUS/Standard 中的自接触（Self-contact (Standard)）

在创建 ABAQUS/Standard 的通用分析步后，用户可以在“创建相互作用”对话框中选择“定义自接触”。单击“继续”按钮，在视图区选择可变形的面，单击提示区的“完成”按钮；或单击提示区中右侧的“表面”按钮，在弹出的“区域选择”对话框中选择已创建的表面，单击“继续”按钮。弹出“编辑相互作用”对话框，如图 5-9 所示。下面对该对话框进行介绍。

- 接触作用属性（Contact interaction property）：该栏用于选择接触属性。若之前没有设置接触属性，可以单击按钮进行创建。
- 离散化方法（Constraint enforcement method）：该栏用于选择约束增强方法，即接触离散化。用户可以选择表面-表面和结点-表面两种方式，与 ABAQUS/Standard 中的面一面接触（Surface-to-surface contact (Standard)）相同。

■ 排除壳/膜厚度（Exclude shell/membrane element thickness）：该栏用于选择是否考虑壳或膜的厚度。当离散化方法（Constraint enforcement method）栏为“表面-表面”时，该选项被激活，用户可以选择是否考虑壳或膜的厚度；当离散化方法（Constraint enforcement method）栏为“结点-表面”时，ABAQUS 不考虑壳或膜的厚度。

■ 平滑度（Degree of smoothing）：如同 ABAQUS/Standard 中的面－面接触（Surface-to-surface contact (Standard)），该栏用于输入主面边界长度的分数作为主面平滑度参数，该值小于 0.5，默认值为 0.2。

■ 接触控制（Contact controls）：该栏用于选择已建立的接触控制。

ABAQUS/Explicit 中的面－面接触（Surface-to-surface contact (Explicit)）

在创建 ABAQUS/Explicit 的分析步后，用户可以在“创建相互作用”对话框中选择“通用接触（显式）”定义面－面接触。

单击“继续”按钮，分别选择第一个表面和第二个表面/结点集合区域，方法与 ABAQUS/Standard 中的面－面接触（Surface-to-surface contact (Standard)）中主面和从面/从结点的选择相同。

之后，弹出“编辑相互作用”（Edit Interaction）对话框，如图 5-10 所示。下面对该对话框进行介绍。



图 5-9 编辑相互作用



图 5-10 编辑相互作用

■ “曲面转换”按钮：该按钮用于交换第一个表面和第二个表面，在选择第二个表面时被激活。在视图区中，第一个表面为红色，第二个表面为紫红色。

■ 力学约束公式化（Mechanical constraint formulation）：该栏用于选择约束增强方法。

● 运动接触法（Kinematic contact method）：用于选择动力学预测/修正接触算法。

● 罚接触方法（Penalty contact method）：用于选择罚函数接触算法。

■ 滑移公式（Sliding formulation）：该栏用于选择滑移公式。

- 有限滑移（Finite sliding）：用于选择有限滑移公式，允许接触面间的任意分离、滑动和旋转，此为默认选项。
- 小滑移（Small sliding）：用于选择小滑移公式，在整个分析中，接触面间的相对运动都较小。
- ■ 过盈量（Clearance）：当选择小滑移公式（在滑移公式（Sliding formulation）选项选择“小滑移”（Small sliding））时，该区域用于指定主面和从面之间的初始间距或过盈，设置方法与 ABAQUS/Standard 中的面－面接触（Surface-to-surface contact (Standard)）完全相同。
- ■ 接触作用属性（Contact interaction property）：该栏用于选择接触作用属性。若之前没有设置，可以单击按钮进行创建。
- ■ 权系数（Weighting factor）：该栏用于选择主－从接触算法，包括单纯主－从接触算法（始终以第一个表面为主面）和平衡主－从接触算法，后者使结果更精确，但要花费更多的计算时间。
- 使用分析默认值（Use analysis default）：ABAQUS/Explicit 根据选择的约束增强方法和模型的情况选用默认的单纯主－从接触算法。
- 指定（Specify）：用户指定权重因子，取值范围为 0~1。该值为 0 表示第一个表面为从面，第二个表面为主面；该值为 1 表示第一个表面为主面，第二个表面为从面；该值在 0~1 之间时，ABAQUS/Explicit 采用平衡主－从接触算法，该值为 0.5 时，采用默认的平衡主－从接触算法。
- ■ 接触控制（Contact controls）：该栏用于选择已建立的接触控制。

ABAQUS/Explicit 中的自接触（Self-contact (Explicit)）

在创建 ABAQUS/Explicit 的分析步后，用户可以在“创建相互作用”对话框中选择“定义自接触（Self-contact（Explicit））。单击“继续”按钮，选择可变形的面，方法与 ABAQUS/Standard 中的自接触（Self-contact (Standard)）中面的选择相同。弹出“编辑相互作用”对话框，如图 5-11 所示。下面对该对话框进行介绍。



图 5-11　编辑相互作用

- ■ 力学约束公式化（Mechanical constraint formulation）：该栏用于选择约束增强方法。
- 运动接触法（Kinematic contact method）：用于选择动力学预测/修正接触算法。
- 罚接触方法（Penalty contact method）：用于选择罚函数接触算法。
- ■ 接触作用属性（Contact interaction property）：该栏用于选择接触属性。若之前没有设置，可以单击按钮进行创建。
- ■ 接触控制（Contact controls）：该栏用于选择已建立的接触控制。

ABAQUS/Explicit 中的通用接触（General contact (Explicit)）

在创建 ABAQUS/Explicit 的分析步后，用户可以在“创建相互作用”对话框中选择“通用接触”（Explicit）定义通用接触。单击“继续”按钮，弹出“编辑相互作用”对话框，如图 5-12 所示。下面对该对话框进行介绍。

■ 接触领域（Contact Domain）：该选项组用于指定接触区域。

● 全部*含自身（All* with self）：该选项用于将模型中所有的外部表面、壳的边界、梁的片断和分析刚体的表面指定为接触区域。

● 所选的成对面（Selected surface pairs）：选择该选项，单击“编辑”按钮，弹出“编辑内置对”对话框，如图 5-13 所示，用户可以在该对话框内指定接触对。分别在“选择对”的两栏内选择面，单击>>按钮，将选择的面传递到右侧的“包括对”数据表中，用户可以单击“删除指定行”按钮删除已指定的接触对。设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。



图 5-12 编辑相互作用



图 5-13 编辑内置对

■ 属性指派（Attribute Assignments）：该选项组用于指定任何步骤中的通用接触属性。

● 接触属性（Contact Properties）：该选项卡用于设置接触属性。

✧ 全局属性指派（Global property assignments）：该栏用于选择分配到整个接触区域的接触属性。若之前没有设置接触属性，可以单击按钮进行创建。

✧ 独特的属性指派（Individual property assignments）：该栏用于对每个接触对分配不同的接触属性。单击“编辑”按钮，弹出“编辑单个接触属性指派”（Edit Individual Contact Property Assignments）对话框，其使用与“编辑内置对”（Edit Included Pairs）对话框类似，设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。

● 表面属性（Surface Properties）：该选项卡用于设置表面属性。

✧ 面的厚度指定（Surface thickness assignments）：该栏用于指定壳或膜的厚度。单击“编辑”按钮，弹出“编辑面的厚度指定”（Surface thickness assignments）对话框。面的厚度指定（Surface thickness assignments）表格中第二列默认为 ORIGINAL，表示采用壳或膜的原始厚度；输入 THINNING，表示采用壳或膜的当前厚度；也可以直接输入壳或膜的厚度值。用户也可以在第三列输入比例因子，默认值为 1。设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。

✧ 壳/膜偏移指派（Shell/Membrane offset assignments）：该栏用于指定壳或膜的偏移。单击“编辑”按钮，弹出“编辑壳/膜偏移指派”（Shell/Membrane offset assignments）对话框，其使用与“编辑面的厚度指定”（Surface thickness assignments）对话框类

似。壳/膜偏移指派（Shell/Membrane offset assignments）表格中第二列默认为ORIGINAL，表示采用壳或膜的原始偏移量；输入“SPOS”，表示采用壳或膜的顶面为基准面；输入“SENG”，表示采用壳或膜的底面为基准面；也可以直接输入壳或膜的偏移量分数，范围为-0.5～0.5。设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。

✧ 特征边缘标准分布（Feature edge criteria assignments）：该栏用于控制包含在通用接触区域内的特征边界（包括壳的周边界和几何特征边界）。单击“编辑”按钮，弹出“编辑特征边缘标准分布”（Feature edge criteria assignments）对话框，其使用与“编辑面的厚度指定”（Surface thickness assignments）对话框类似。编辑特征边缘标准分布（Feature edge criteria assignments）表格中第二列默认为 PERIMETER，表示在通用接触区域内包含周边界；输入 NONE，表示在通用接触区域内不包含特征边界；也可以直接指定一个大于 20° 的角度，在通用接触区域内包含特征角大于或等于该指定角度的特征边界。设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。

● 接触公式（Contact Formulation）：该选项卡用于设置单纯主－从接触算法中的主面和从面。单击“编辑”按钮，弹出“编辑纯主-从指派”对话框，其使用与“编辑面的厚度指定”（Surface thickness assignments）对话框类似，编辑纯主-从指派表格中第二列默认为 SLAVE，表示第一个表面为从面；输入“MASTER”，表示第一个表面为主面。设置完成，单击“确定”按钮，返回“编辑相互作用”对话框。

用户可以通过相互作用、接触控制、创建命令定义接触控制，适用于 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 中的面－面接触和自接触，详见相关系统帮助文件。

用户要慎用接触控制。因为接触控制的默认设置适用于大多数分析，改变默认设置可能增加计算时间或产生不精确的解。

5.2 约束（Constraint）

在相互作用（Interaction）功能模块中，用户可以使用主菜单中的“约束（Constraint）”菜单及工具区中的“创建约束（Create Constraint）”工具和“约束管理器（Constraint Manager）”工具进行约束的定义和编辑等操作。该模块中的约束（Constraint）是约束模型中各部分间的自由度，而装配（Assembly）功能模块中的约束仅仅是限定装配件中各部件的相对位置。

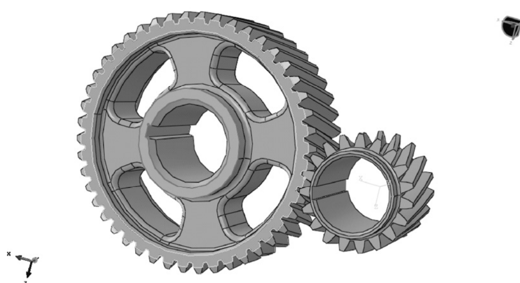
5.2.1 绑定（Tie）约束

启动 ABAQUS/CAE，打开本节示例文件夹中的模型数据库 ex5.2.cae，单击按钮，弹出图 5-14 所示的“创建约束”，选择“绑定”，单击“继续”，拾取主面如图 5-15 所示。

单击提示区的“完成”按钮，拾取从面如图 5-16 所示。单击中键，弹出图 5-17 所示的“编辑约束”对话框。



图 5-14　创建约束


图 5-15　拾取主面

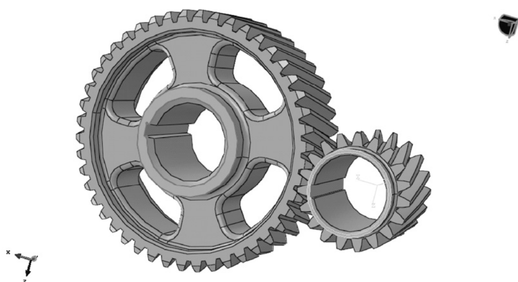

图 5-16　拾取从面



图 5-17　编辑约束

- ■ “曲面转换”按钮：该按钮用于交换主面和从面，在主面和从面的类型相同时被激活。在视图区中，主面为红色，从面为紫红色。
- ■ 离散化方法（Constraint enforcement method）：该栏用于选择约束增强方法。
- ● 分析默认值（Analysis default）：采用默认的约束增强方法，即在 ABAQUS/Standard 中采用表面-表面（Surface to surface），在 ABAQUS/Explicit 中采用结点-表面（Node to surface）。
- ● 结点-表面（Node to surface）：类似于 ABAQUS/Standard 中的面-面接触，此处不再赘述。该方法适用于两种从面类型。
- ● 表面-表面（Surface to surface）：该方法考虑了主面和从面的形状，提高了计算精确度，但要增加计算时间。该方法仅适用于主面和从面的类型都是面的情况。
- ■ 排除壳单元厚度（Exclude shell element thickness）：该复选框用于选择是否考虑壳的厚度。
- ■ 位置公差（Position Tolerance）：该选项组用于设置被绑定的从面结点的区域，位于该公差以外的从面结点将不被绑定。

- 使用计算得到的默认值（Use computed default）：ABAQUS 采用默认的位置公差确定被绑定的从面结点的区域。
- 指定距离（Specify distance）：该栏用于指定一个距离值，从主面延伸该设定的距离为绑定区域，ABAQUS 将区域内的从面结点进行绑定。

■ 调整从表面初始位置（Adjust slave surface initial position）：该复选框用于调整从面结点的初始位置，使被绑定的从面结点移动到与主面接触的位置。该功能仅仅是对模型几何的调整，不产生应力/应变。

■ 绑定转动自由度（可应用的话）（Tie rotational DOFs if applicable）：该复选框用于约束主面和从面间的旋转自由度。

■ 约束比（Constraint Ratio）：该选项组用于设置约束比率（主面和从面间距离的分数）来定位平移约束，当不选择“绑定转动自由度（可应用的话）”（Tie rotational DOFs if applicable）时被激活。

- 使用分析默认值（Use analysis default）：此为默认选项，ABAQUS 自动选择约束比率。
- 指定值（Specify value）：用户指定一个约束比率。

5.2.2 刚体（Rigid body）约束

刚体（Rigid body）约束用于创建一个刚性区域（结点、单元或面），在整个分析过程中，该区域内结点和单元的相对位置保持不变，该区域跟随指定的一个参考点发生刚体位移。

将刚度大的区域定义为刚体可以提高计算效率，在多体动力学分析中非常有用。刚体的运动可以通过施加在参考点上的边界条件被指定；刚体可用于定义面-面接触和通用接触。

在定义刚体约束之前，必须先创建一个参考点。参考点的创建过程非常简单，选择主菜单上的“工具→参考点”，在提示区输入参考点坐标，按〈Enter〉键，ABAQUS 在该坐标处创建一个参考点；或在视图区选取模型上的一点，ABAQUS 在与该点重合的位置创建一个参考点，参考点有一个“RP”标志，如图 5-18 所示。

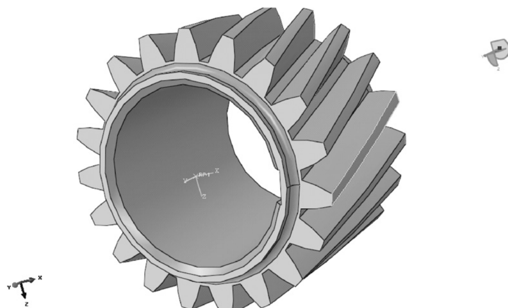


图 5-18　参考点

单击按钮，弹出图 5-19 所示的“创建约束”对话框，选择刚体，单击“继续”按钮，弹出图 5-20 所示的“编辑约束”对话框。



图 5-19 创建约束



图 5-20 编辑约束

■ 类型：刚体（Region type：Region）：该表格用于选择刚体区域的类型，单击按钮选择相应的刚体区域（方法与接触面的选择相同），单击按钮删除已选择的刚体区域。

● 体（单元）（Body）：选择几何模型或网格模型中的单元为刚体，用户可以选择单元、分区、壳的面和线模型的边界。

● 铰结（结点）（Pin）：选择点、线、面或Cells 上的结点为刚体，这些结点只有平移自由度。

● 绑定（结点）（Tie）：选择点、线、面或 Cells 上的结点为刚体，这些结点有平移和旋转自由度。

● 解析表面（Analytical Surface）：选择解析表面为刚体。

■ 参考点（Reference point）：该选项组用于选择参考点。

● 按钮：该按钮用于选择参考点。

● 在分析开始时将点调整到质心（Adjust point to center of mass at start of analysis）：该复选框用于将参考点定位到刚体的质心。

● 将所选区域限制为等温的（只应用于耦合势-应力分析）（Constrain selected regions to be isothermal）：该复选框用于指定等温的刚体，仅适用于热-力耦合分析（Coupled temp-displacement）。

设置完成，单击“确定”按钮。

5.2.3 显示体（Display body）约束

显示体（Display body）是仅用于显示的部件实体，不参与分析，也不用划分网格。显示体能被固定或跟随指定的结点发生刚体位移。

与刚体约束不同的是，显示体约束不能在显示体上指定边界条件、载荷和相互作用等。显示体常被用到机械和多体动力学分析中，将刚体定义为简单形状，其复杂的真实形态用显示体代表，以提高 Visualization 功能模块中分析结果的显示质量。

单击按钮，弹出图 5-21 所示的“创建约束”对话框，选择“显示体”，单击“继续”，在视图区中选择显示的体，单击中键，弹出图 5-22 所示的“编辑约束”对话框。

■ 无运动（No motion）：此为默认选项，在整个分析过程中，显示体固定不动。

■ 跟随单个点（Follow single point）：选择该选项，单击按钮，在视图区中选择另一

个非显示体的部件实体上的一点，在整个分析过程中，显示体与该点的相对位置保持不变。



图 5-21　创建约束



图 5-22　编辑约束

■ 跟随 3 个点（Follow three points）：选择该选项，单击按钮，在视图区中选择另外非显示体的部件实体上的三个点，这三个点定义一个坐标系，第一个点代表坐标原点，第二个点是 X 轴上的一点，第三个点是 X-Y 平面内的一点，故在整个分析中这三个点不能共线。在整个分析过程中，显示体跟随这三点定义的坐标系而发生平移和旋转。

设置完成，单击“确定”按钮完成。

5.2.4 耦合（Coupling）约束

耦合（Coupling）约束用于将一个面的运动和一个约束控制点的运动约束在一起。

单击按钮，弹出图 5-23 所示的“创建约束”对话框，选择“耦合的”，单击“继续”，拾取控制点，单击中键，再拾取耦合区域，单击中键，弹出图 5-24 所示的“编辑约束”对话框。



图 5-23　创建约束

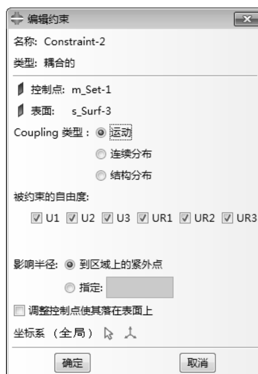


图 5-24　编辑约束

■ Coupling 类型（Coupling type）：该栏用于选择耦合的类型。

● 运动（Kinematic）：该选项用于指定运动耦合约束，约束区域内的耦合结点相对于约束控制点发生刚体运动。

● 连续分布/结构分布（Distributing）：这两个选项用于指定分布耦合约束，约束区域内

的耦合结点的合力和合力矩等于约束控制点上的力和力矩。

■ 被约束的自由度（Constrained degrees of freedom）：该栏用于指定被约束的自由度，默认为约束所有的自由度。对于运动耦合约束，用户可以选择是否约束三个平移自由度和三个旋转自由度；对于分布耦合约束，ABAQUS 自动约束三个平移自由度，用户只能选择是否约束三个旋转自由度。

■ 权方法（Weighting method）：分布耦合约束（Distributing）对约束区域内各耦合结点的运动进行加权平均，该栏用于选择加权方法。

● Uniform：此为默认选项，采用统一的加权因子 1。

● Linear：约束区域内各耦合结点的加权因子与该结点到约束控制点的距离呈线性关系，见式（5-1）。

$$\omega_i = 1 - \frac{r_i}{r_0} \tag{5-1}$$

其中，ω_i——结点i的加权因子，

r_i——结点与约束控制点间的距离，

r_0——约束区域内耦合结点与约束控制点间的最远距离。

● Quadratic：约束区域内各耦合结点的加权因子与该结点到约束控制点的距离呈二次关系，见式（5-2）。

$$\omega_i = 1 - \left(\frac{r_i}{r_0}\right)^2 \tag{5-2}$$

● Cubic：约束区域内各耦合结点的加权因子与该结点到约束控制点的距离关系为三次多项式，见式（5-3）。

$$\omega_i = 1 - 3\left(\frac{r_i}{r_0}\right)^2 + 2\left(\frac{r_i}{r_0}\right)^3 \tag{5-3}$$

■ 影响半径（Influence radius）：该栏用于指定约束区域内的耦合结点。

● 到区域上的紧外点（To outermost point on the region）：此为默认选项，约束区域内的所有结点都被指定为耦合结点。

● 指定（Specify）：该栏用于输入影响半径来指定约束区域内的耦合结点，以约束控制点为圆心、输入的影响半径值为半径的球体为耦合结点的选择区域。若约束区域的类型为结点区域（Node Region），则在选定的约束区域内，位于该球体内的结点为耦合结点；若约束区域的类型为表面（Surface），则在选定的约束区域内，包含在或部分包含在该球体内的单元面的所有结点为耦合结点。

■ 坐标系全局（Csys）：该栏用于选择耦合约束的坐标系，默认为整体坐标系。若需改变当前坐标系，单击按钮，选择已建立的局部坐标系。

设置完成，单击“确定”按钮。

5.3 连接器（Connector）

连接器（Connector）用于连接模型装配件中的两个点（通常位于两个不同的部件实体上）或模型装配件中的一个点和地面，建立它们之间的运动约束关系，也可以选择输出变量并在可视化（Visualization）功能模块中进行分析。

如同属性（Property）功能模块中截面特性的设置，在定义连接器之前，需要先创建连

接器的截面特性（包括连接器的类型和相关属性）和代表连接器的特征线，再将已定义的连接器的截面特性分配给指定的连接器，同时对该连接器划分相应的连接单元。

5.3.1 连接器的截面特性

ABAQUS 中的连接器分为基础（Basic）连接器和装配（Assembled）连接器，其中基础连接器又分为平移（Translational）连接器和旋转（Rotational）连接器，组合连接器则是一个平移连接器和一个旋转连接器的组合。

平移连接器影响连接器两个端点的平移自由度，还可能影响第一个端点的旋转自由度；旋转连接器仅影响连接器两个端点的旋转自由度。

单击按钮，弹出图 5-25 所示的“创建连接截面”对话框，选择“连接种类”为“基本信息”（此处译作基本连接器或基础连接器更恰当，即英文版中的 Basic），选择“平移类型”为“加速计”，单击“继续”按钮，弹出图 5-26 所示的“编辑连接截面”对话框。



图 5-25　创建连接截面



图 5-26　编辑连接截面

在图 5-26 所示的“编辑连接截面”对话框中可以对连接器进行详细设置，下面将对上述的两个对话框详细介绍。

不同类型的连接器对两个端点的局部坐标系的要求不同，可分为三种情况。Required（仅适用于连接器的第一个端点）：用户需要在该端点定义局部坐标系；Ignored：用户不需要在该端点定义局部坐标系；Optional：用户可以选择是否在该端点定义局部坐标系。

ABAQUS 支持超过 30 种连接器类型，规定了每种连接器两端点之间的相对运动分量（三个方向的平移相对运动分量为 U1、U2、U3，三个方向的旋转相对运动分量为 UR1、UR2、UR3），包括被约束的相对运动分量（在该方向两端点间产生指定的相对平移或相对旋转，可以输出约束力或力矩）和可用的相对运动分量（用户可以在该方向上定义连接器属性、载荷、边界条件等，也可以输出相应的力或力矩）。

■ 连接类型（Connection Type）：该栏用于选择连接器的类型。读者若想了解各种连接器类型的详细描述，请参阅相关系统帮助文件。

● 基本类型（Basic types）：用于选择基础连接器的类型，用户可以只选择一种连接器（平移连接器或旋转连接器），也可以选择一种平移连接器和一种旋转连接器。

✧ 平移类型（Translational type）

加速计（Accelerometer）：无相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

轴向（Axial）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 U1、U2、U3；两个

端点的局部坐标系要求为 Optional。

笛卡尔（Cartesian）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 U1；第一个端点的局部坐标系要求为 Optional，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

加入（Joint）：被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3，无可用的相对运动分量；第一个端点的局部坐标系要求为 Optional，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

链接（Link）：分析过程中两点之间的距离保持不变，无可用的相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

Proj 笛卡尔（Proj Cartesian）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 U1、U2、U3；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

径向压力（Radial-Thrust）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 U1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

滑动平面（Slide-Plane）：被约束的相对运动分量为 U1，可用的相对运动分量为 U2、U3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

插槽（Slot）：被约束的相对运动分量为 U2、U3，可用的相对运动分量为 U1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

✧ 旋转类型（Rotational type）

对齐（Align）：被约束的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3，无可用的相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

Cardan：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

速度常数（Constant Velocity）：被约束的相对运动分量为 UR2，无可用的相对运动分量；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

欧拉（Euler）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

弯—扭（Flexion-Torsion）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

流量转换器（Flow-Converter）：被约束的相对运动分量为 UR3，无可用的相对运动分量；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

Proj Flex-Tors：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

转动（Revolute）：被约束的相对运动分量为 UR2、UR3，可用的相对运动分量为 UR1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

旋转（Rotation）：无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 UR1、UR2、UR3；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

旋转加速度计（Rotation-Accelerometer）：无相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

全局（Universal）：被约束的相对运动分量为 UR2，可用的相对运动分量为 UR1、

UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

- 已装配/复数（Assembled types）：此为默认选项，用于选择组合连接器的类型，ABAQUS 包括 10 种组合连接器。

梁（Beam）：相当于加入+对齐，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR1、UR2、UR3，无可用的相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

衬套（Bushing）：相当于 Proj 笛卡儿+Proj Flex-Tors，无被约束的相对运动分量，可用的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR1、UR2、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

CV 连接（CV Joint）：相当于加入+速度常数，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR2，无可用的相对运动分量；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

柱坐标系（Cylindrical）：相当于插槽+转动，被约束的相对运动分量为 U2、U3、UR2、UR3，可用的相对运动分量为 U1、UR1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

铰（Hinge）：相当于加入+转动，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR2、UR3，可用的相对运动分量为 UR1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

平面（Planar）：相当于滑动平面+转动，被约束的相对运动分量为 U1、UR2、UR3，可用的相对运动分量为 U2、U3、UR1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

牵引器（Retractor）：相当于加入+流动转换，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR3，无可用的相对运动分量；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Ignored。

滑环（Translator）：相当于插槽+对齐，被约束的相对运动分量为 U2、U3、UR1、UR2、UR3，可用的相对运动分量为 U1；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

U 接头（U Joint）：相当于加入+全局，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR2，可用的相对运动分量为 UR1、UR3；第一个端点的局部坐标系要求为 Required，第二个端点的局部坐标系要求为 Optional。

焊接（Weld）：相当于加入+对齐，被约束的相对运动分量为 U1、U2、U3、UR1、UR2、UR3，无可用的相对运动分量；两个端点的局部坐标系要求为 Optional。

- 连接类型图表（Connection type diagram）：单击💡按钮用于显示已选择连接器的图例。

选择连接器类型后，单击“继续”按钮，弹出“编辑连接器截面（Edit Connector Section）”对话框，如图 5-26 所示。与“编辑接触属性（Edit Contact Property）”对话框类似，用户可以根据需要在该对话框内指定连接器属性。

ABAQUS 包括 10 种连接器属性，单击 + 按钮可进行添加，单击按钮可删除已添加的连接器属性。具体设置请读者参见相关系统帮助文件，后续的实例中也会有所涉及，这里简单介绍 10 种以供参考。

（1）弹性（Elasticity）：用于定义类似于弹簧的弹性属性。

（2）阻尼（Damping）：用于定义阻尼属性。

（3）摩擦（Friction）：用于定义与摩擦相关的属性。

（4）塑性（Plasticity）：用于定义塑性属性。

（5）损伤（Damage）：用于定义损伤初始化和演化准则。

（6）停止（Stop）：用于定义运动限制属性。

（7）锁定（Lock）：用于定义相对运动的锁定准则。

（8）失效（Failure）：用于定义失效准则。

（9）参考长度（Reference Length）：用于定义参考长度/角度。

（10）积分（Integration）：用于定义弹性属性、阻尼属性和摩擦属性的时间积分（隐式或显式），仅适用于 ABAQUS/Explicit。

5.3.2 连接器的特征线

代表连接器的特征线可以是装配件中的两个点的连线或装配件中的一个点和地面的连线。单击工具区中的"创建点对点的线（Create Point-to-point Wires）"工具，或选择"连接→几何→创建线条特征"命令，弹出"创建线框特征"对话框，如图 5-27 所示。下面对该对话框进行介绍。



图 5-27 创建线框特征

■ 点对（Point Pairs）：该选项组用于选择特征线的类型并创建该类型下的特征线，以及对已创建特征线进行修改。

● 分离的线条（Disjoint wires）：两个点（模型的顶点、结点或参考点）构成一条特征线，分别为特征线的第一个端点和第二个端点。

● 成链的线条（Chained wires）：所有选择的点（n 个）首尾相连，构成 n（存在封闭区域）或 n-1（不存在封闭区域）条特征线，选择的第 1 个点为第一条特征线的第一个端点，第 n 个点为最后一条特征线的第二个端点，其他各点分别为前一条特征线的第二个端点和后一条特征线的第一个端点。

● 到地面的线（Wires to ground）：模型中的一个点与地面构成一条特征线，选择的点为特征线的第二个端点。

■ （添加）：单击按钮，按指定的特征线类型，在视图区选择点创建特征线；已建立的特征线被列在表格中。

■ （编辑）：选择表格中要修改的特征线端点，按钮被激活，单击该按钮，在视图区重新选择点替换原来的端点，特征线也发生相应的变化。

■ （删除）：单击表格中要删除的特征线的标号，按钮被激活，用户可以单击该按钮删除选择的特征线。

■ （交换）：如同按钮，单击表格中要交换端点的特征线的标号，按钮被激活，用户可以单击该按钮交换特征线的两个端点。

- ■ 创建线框集合（Create set of wires）：该复选框用于选择是否创建包含该组特征线的Set（集合），默认为选择此选项，集合名称为 Wire-n-Set-1（n 为第 n 组创建的特征线）。

连接器截面特性的设置和特征线的创建没有先后顺序，但在定义连接单元之前必须完成这两部分的操作。

5.3.3 连接单元

完成连接器截面特性的设置和特征线的创建后，用户需要将已定义的连接器的截面特性分配给指定的连接器（特征线），同时对该连接器划分相应的连接单元。

单击工具区中的“创建连接截面指派（Create Connector Assignment）”工具，或选择“连接→指派→创建”命令，根据提示选择特征线（如同接触面的选择），弹出“编辑连接截面指派（Edit Connector Section Assignmen）”对话框，如图 5-28 所示。该对话框包含截面、方向 1、方向 2 三个选项卡。



图 5-28 编辑连接截面指派

- ■ 截面（Section）：该选项卡用于选择连接器的截面特性。按钮用于创建连接器的截面特性，按钮用于显示已选择连接器的图例。
- ■ 方向 1（Orientation 1）：该选项卡用于指定连接器第一个端点的坐标系。当该端点的局部坐标系要求为 Ignored 时，该页面不可用。
- ● 指定全局坐标系（Specify CSYS）：当用户想为连接器的第一个端点指定局部坐标系时，单击按钮，选择已定义的局部坐标系。默认为选择整体坐标系。当该端点的局部坐标系要求为 Required 时，用户必须指定局部坐标系，否则 ABAQUS/CAE 将显示错误信息。
- ● 没有修改坐标系（No modifications to CSYS）：不修改已选择的局部坐标系。当用户选择了局部坐标系时，该选项被激活。
- ● 附加旋转角（Additional rotation angle）：该选项用于旋转局部坐标系。用户需要在后面的空格内输入旋转角度，并在下方的“关于轴”（About axis）栏中选择“旋转轴”。当用户选择了局部坐标系时，该选项被激活。
- ■ 方向 2（Orientation 2）：该选项卡用于指定连接器第二个端点的坐标系。当该端点的局部坐标系要求为 Ignored 时，该选项卡不可用。
- ● 使用方向 1（Use orientation 1）：此为默认选项，使用连接器第一个端点的坐标系。
- ● 没有修改坐标系（No modifications to CSYS）：该选项用于选择连接器第二个端点的

坐标系，默认为整体坐标系。选择该选项，指定坐标系（Specify CSYS）栏的按钮被激活，用户可以单击该按钮指定局部坐标系，并且不修改已选择的局部坐标系。

- 附加旋转角（Additional rotation angle）：如同方向 1（Orientation 1）选项卡，当用户选择了局部坐标系时，该选项被激活，用于旋转局部坐标系。

5.4 本章小结

本章为读者介绍相互作用模块。在相互作用模块中可以定义包括接触、约束和连接器等的相互作用关系。注意这里的约束是指的刚体、显示体耦合等约束关系，关于位置的约束是在载荷模块中的边界条件中定义的，将在后文中介绍。

在相互作用模块中，有一个技巧是注意集与表面的创建。即在进行创建相互作用的之前，先创建作用对象的集或者表面，然后从对话框中选择，免去选择不方便的麻烦。

至此读者也应基本了解 ABAQUS 操作思想中的一个基本特点——相互之间的关系是一个对象，关系的属性是一个对象，两者相互可以调用。基于其组合丰富的特点性，用以模拟复杂的现实条件。

第 6 章　载荷与边界条件

选择模块列表中的载荷（Load），进入载荷（Load）功能模块。此模块主要用于定义模型装配件的载荷、边界条件、预定义场和载荷状况，故在进入该模块之前，用户需要在装配（Assembly）功能模块中创建装配件并完成各部件实体的定位。另外，载荷、边界条件、预定义场和载荷状况都是与步骤相关的，用户需要事先创建相关的分析步。

本章学习目标

- 掌握 ABAQUS 载荷模块的使用方法
- 掌握 ABAQUS 中载荷的概念
- 掌握 ABAQUS 中边界条件的概念
- 掌握 ABAQUS 中加载与设置边界的方法

6.1　载荷（Load）

加载使物体结构变形和产生应力。大部分加载的形式包括：

- 点载荷
- 表面载荷
- 体力，如重力
- 热载荷

进入载荷功能模块后，主菜单中的“载荷”菜单及工具区中第一行的“创建载荷”（Create Load）工具和“载荷管理器”（Load Manager）工具用于载荷的创建和管理。

6.1.1　定义载荷

用户定义载荷时，单击工具区中的（“创建载荷”，Create Load）工具，或选择“载荷→创建”命令，也可双击左侧模型树中的“载荷”，弹出“创建载荷”（Create Load）对话框，如图 6-1 所示。该对话框包括四个部分。



图 6-1　创建载荷

- 名称（Name）：在该栏内输入载荷的名称，默认为 Load-n（n 表示第 n 个创建的载荷）。
- 分析步（Step）：在该列表内选择用于创建载荷的分析步。在初始步（Initial）中不能定义载荷，用户必须在“Step”列表中选择分析步施加相应的载荷。
- 类别（Category）：该选项用于选择适用于所选分析步的加载种类，包括力学（Mechanical）、热学（Thermal）、声学（Acoustic）、流体（Fluid）、电学/磁

学（Electrical/Magnetic）、质量扩散（Mass diffusion）及其他。对于不同的分析步，可以施加不同的载荷种类。

■ 可用于所选分析步的类型（Types for Selected Step）：该列表用于选择载荷的类型，是类别（Category）的下一级选项。

● 力学（Mechanical）：包括 Concentrated force（集中力）、Moment（弯矩）、Pressure（压强）、Shell edge load（壳的边载荷）、Surface traction（表面载荷）、Pipe pressure（管道压力）、Body force（体力）、Line load（线载荷）、Gravity（重力，输入指定方向的加速度）、Bolt load（螺栓载荷）、Generalized plane strain（广义平面应变）、Rotational body force（旋转体力）、Coriolis force（科氏力）、Connector force（连接作用力）、Connector moment（连接弯矩）及 Inertia relief（惯性释放）。

● 热学（Thermal）：包括 Surface heat flux（表面热通量）、Body heat flux（体热通量）及 Concentrated heat flux（集中热通量）。

● 声学（Acoustic）：可设置 Inward volume acceleration（声媒介边界上点或结点的容积加速度）。

● 流体（Fluid）：包括 Concentrated pore fluid（点或结点上的集中孔隙流速）、Surface pore fluid（垂直于表面的孔隙流速）。

● 电学/磁学（Electrical/Magnetic）：包括压电分析中的 Concentrated charge（集中电荷）、Surface charge（面上的电荷密度）、Body charge（体上的电荷密度），热-电耦合分析中的 Concentrated current（集中电流）、Surface current（面上的电流密度）及 Body current（体上的电流密度）。

● 质量扩散（Mass diffusion）：包括 Concentrated concentration flux（集中浓度流量）、Surface concentration flux（面上的浓度流量密度）、Body concentration flux（体上的浓度流量密度）。

6.1.2 集中力

在图 6-1 所示的“创建载荷”对话框中选择“集中力”（Concentrated force）之后，单击“继续”按钮，选择施加集中力的几何实体上的顶点、参考点或网格实体上的结点，单击提示区的“完成”按钮，弹出图 6-2 所示的“编辑载荷”（Edit Load）对话框。

■ 坐标系（CSYS）：用于选择载荷对应的坐标系，默认为整体坐标系（Global）。单击按钮，选择局部坐标系。

■ CF1、CF2、CF3：分别为集中力在三个方向上的分量。与坐标轴正方向同向的力为正值，反之为负，不输入值则默认为 0。

■ 幅值（Amplitude）：该列表用于选择集中力随时间/频率变化的规律。对于静力学分析，默认的是 Ramp，表示集中力由 0 线性增长到给定值；对于动力学分析，默认的是 Instantaneous，为瞬时加载。若用户已通过“工具→幅值→创建”命令定义了幅值，可以在该列表内进行选择；若用户没有定义幅值，可以单击按钮定义随时间变化的加载方式，如 Tabular（由表格



图 6-2 编辑载荷

给定的载荷与时间/频率的关系）、Equally spaced（按等时间/频率间距变化的载荷）和 Periodic（周期变化的载荷）等。

- 跟随结点旋转（Follow nodal rotation）：该复选框用于选择集中力是否随着结点的旋转而改变。在小变形分析中可以不作选择，认为力的方向不随模型变形方向的改变而改变；而在大变形分析中应该选择该项。

输入集中力对应的坐标系三个方向上的分量的值或设置随时间变化的载荷后，单击“确定”按钮就完成了集中力的施加。加载在几何顶点或参考点上的集中力会自动转换为加载在相应结点上的集中力。

6.1.3 弯矩

在图 6-1 所示的“创建载荷”对话框中选择“弯矩”（Moment）之后，单击“继续”按钮，选择施加弯矩的几何实体上的顶点、参考点或网格实体上的结点，单击提示区的“完成”按钮，弹出图 6-3 所示的“编辑载荷”（Edit Load）对话框。



图 6-3 编辑载荷

- 坐标系（CSYS）：用于选择载荷对应的坐标系，默认为整体坐标系（Global）。单击按钮，选择局部坐标系。
- CM1、CM2、CM3：分别为弯矩在三个方向上的分量。与坐标轴正方向同向的力为正值，反之为负，不输入值则默认为 0。
- 幅值（Amplitude）：该列表用于选择弯矩随时间/频率变化的规律。对于静力学分析，默认的是 Ramp，表示弯矩由 0 线性增长到给定值；对于动力学分析，默认的是 Instantaneous，为瞬时加载。若用户已通过“工具→幅值→创建”命令定义了幅值，可以在该列表内进行选择；若用户没有定义幅值，可以单击按钮定义随时间变化的加载方式，如 Tabular（由表格给定的载荷与时间/频率的关系）、Equally spaced（按等时间/频率间距变化的载荷）和 Periodic（周期变化的载荷）等。
- 跟随结点旋转（Follow nodal rotation）：该选项用于选择弯矩是否随着结点的旋转而改变。在小变形分析中可以不作选择，认为弯矩的方向不随模型变形方向的改变而改变；而在大变形分析中应该选择该项。

6.1.4 压强

这里的压强即工程上习惯所称的压力。在图 6-1 所示的“创建载荷”对话框中选择“压强”（Pressure）之后，单击“继续”按钮，选择施加压力的几何实体的表面，载荷的方向与选择的面垂直，单击提示区的“完成”按钮，弹出图 6-4 所示的“编辑载荷”（Edit Load）对话框。



图 6-4 编辑载荷

首先，用户需要在“分布”（Distribution）列表中选择压力的分布方式，每种分布方式都有各自的设置选项。

- 一致（Uniform）：施加均匀分布的压力。

- 大小（Magnitude）：输入压力值，正值为压力，负值为拉力。
- 幅值（Amplitude）：该列表用于选择载荷随时间/频率变化的规律，与施加集中力时的设置方法相同，不再赘述。

■ 静水压（Hydrostatic）：施加静水压力，仅适用于 ABAQUS/Standard。

- 大小（Magnitude）：输入压力值。
- 幅值（Amplitude）：该列表用于选择载荷随时间/频率变化的规律。
- 零压强高度（Zero pressure height）：该栏用于输入零压力处的高度。对于三维模型以 Z 轴方向（坐标轴 3 方向）为静水压力随高度变化方向；二维模型以 Y 轴方向（坐标轴 2 方向）为静水压力随高度变化方向。
- 参考压力高度（Reference pressure height）：该栏用于输入参考压力值（Magnitude 栏内设定的压力值）的高度。压力变化方向与坐标轴的关系，同零压强高度中的规定，不再赘述。

■ 用户定义（User-defined）：使用用户子程序 DLOAD（ABAQUS/Standard）或 VDLOAD（ABAQUS/Explicit）定义压力。

- 大小（Magnitude）：如果需要，用户可以在该栏输入压力值。在 ABAQUS/Standard 分析中，该值被输入用户子程序 DLOAD；在 ABAQUS/Explicit 分析中，该值被忽略。

■ 滞止压力（Stagnation）：施加滞止压力，仅适用于 ABAQUS/Explicit。

- 大小（Magnitude）：输入压力值。
- 幅值（Amplitude）：该列表用于选择载荷随时间/频率变化的规律。
- 从参考点确定的相对速度（Determine relative velocity from reference point）：该选项用于选择是否将施加压力的面的速度减去参考点的速度。默认为不选择该选项；若用户选择该选项，需要单击“编辑”（Edit）按钮选择几何模型的顶点、参考点或网格模型的结点作为参考点。

■ 粘性（Viscous）：施加粘性压力，仅适用于 ABAQUS/Explicit，其设置方法同滞止压力，在此不再赘述。

■ f(x)：该按钮用于创建分析场的表达式，创建后该分析场被列入“分布”（Distribution）列表中，可选择压力按此表达式分布。如果用户事先通过“工具→分析场→创建”命令定义了分析场，可以直接在“分布”（Distribution）列表内进行选择。

完成载荷的设置后，单击工具区中工具右侧的“载荷管理器”（Load Manager）工具，可见“载荷管理器”内列出了已创建的载荷。该管理器的用法与第 4 章介绍的“场变量输出要求管理器”和“历史变量输出要求管理器”相同，这里不再赘述。

6.2 边界条件（Boundary Condition）

边界条件是约束模型的某一部分保持固定不变（零位移）或移动规定量的位称（非零位移）。在静态分析中需要足够的边界条件以防止模型在任意方向上的刚体移动；否则，在计算过程中求解器将会发生问题而使模拟过程过早结束。

6.2.1 创建边界条件

主菜单中的“边界条件”（BC）菜单及工具区中第二行的“创建边界条件”（Create Boundary Condition）工具和“边界条件管理器”（Boundary Condition Manager）工具用于边界条件的创建和管理。用户定义边界条件时，单击工具区中的，或选择“边界条件（BC）→创建（Create）”命令，也可双击左侧模型树中的边界条件（BCs），弹出“创建边界条件”（Create Boundary Condition）对话框，如图 6-5 所示。该对话框与“创建载荷”（Create Load）对话框类似，包括四个部分。



图 6-5 “创建边界条件”对话框

- 名称（Name）：在该栏内输入边界条件的名称，默认为 BC-n（n 表示第 n 个创建的边界条件）。
- 分析步（Step）：在该列表内选择用于创建边界条件的步骤，包括初始步和分析步。
- 类别（Category）：该选项用于选择适用于所选步骤的边界条件种类，包括力学（Mechanical）和其他（Other）。
- 可用于所选分析步的类型（Types for Selected Step）：该列表用于选择边界条件的类型，是类别的下一级选项。对于不同的分析步，可以施加不同的边界条件类型。

力学（Mechanical）：包括对称/反对称/完全固定（Symmetry/Antisymmetry/Encastre）、位移/转角（Displacement/Rotation）、速度/角速度（Velocity/Angular velocity）、加速度/角加速度（Acceleration/Angularacceleration）、连接位移（Connector displacement）、连接速度（Connector velocity）、连接加速度（Connector acceleration），如图 6-6 所示。

其他（Other）：包括连接物质流动、欧拉边界、欧拉网格运动、声学压强（Acoustic pressure）、流体气蚀区压力，以及子模型（Submodel，可以在某些分析步中创建），如图 6-7 所示。



图 6-6 “力学”类别下的边界



图 6-7 “其他”类别下的边界

6.2.2 编辑对称/反对称/完全固定边界条件

如图 6-6 所示，选择对称/反对称/完全固定（Symmetry/ Antisymmetry/ Encastre）后，单

击“继续”（Continue）按钮，选择施加该边界条件的点、线、面及几何元素，单击提示区的“完成”按钮，弹出“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框，如图 6-8 所示。该对话框包括以下 8 种单选的边界条件。



图 6-8　编辑对称/反对称/完全固定边界条件

- XSYMM：关于与 X 轴（坐标轴 1）垂直的平面对称（U1=UR2=UR3=0）。
- YSYMM：关于与 Y 轴（坐标轴 2）垂直的平面对称（U2=UR1=UR3=0）。
- ZSYMM：关于与 Z 轴（坐标轴 3）垂直的平面对称（U3=UR1=UR2=0）。
- XASYMM：关于与 X 轴（坐标轴 1）垂直的平面反对称（U2=U3=UR1=0），仅适用于 ABAQUS/ Standard。
- YASYMM：关于与 Y 轴（坐标轴 2）垂直的平面反对称（U1=U3=UR2=0），仅适用于 ABAQUS/ Standard。
- ZASYMM：关于与 Z 轴（坐标轴 3）垂直的平面反对称（U1=U2=UR3=0），仅适用于 ABAQUS/ Standard。
- 铰接（PINNED）：约束三个平移自由度，即铰支约束（U1=U2=U3=0）。
- 完全固定（ENCASTRE）：约束六个自由度，即固支约束（U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0）。

对于结构、载荷和边界条件对称的情况（包括正对称或反对称），可以建立对称面一侧的模型用来计算，并对该对称面施加正对称或反对称边界条件。如对称面与坐标轴 1 垂直的正对称结构，选择 XSYMM。

6.2.3 编辑位移/旋转边界条件

选择“位移/旋转”（Displacement/Rotation）后，单击“继续”（Continue）按钮，选择施加该边界条件的点、线、面、几何元素（cells），单击提示区的“完成”（Done）按钮，弹出“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框，如图 6-9 所示。该对话框包括如下选项。

坐标系（CSYS）：用于选择坐标系，默认为整体坐标系（Global）。单击“编辑”（Edit）按钮，用户可以选择局部坐标系。

方式（Method）：用于选择施加边界条件的方式。对于施加边界条件的分析步，只有当两种方式都有效时，该下拉列表才出现。

指定约束（Specify Constraints）：为指定的自由度设置位移或转角。

固定当前位置（Fixedat Current Position）：固定指定的自由度。若选择该选项，该对话框如图 6-10 所示。

分布（Distribution）：用于选择边界条件的分布方式。当选择固定当前位置（Fixedat Current Position）方式或在 ABAQUS/ Explicit 分析步中定义边界条件时，该选项不被激活。

一致（Uniform）：该选项用于定义均匀分布的边界条件。

用户定义（User-defined）：使用用户子程序 DISP 定义边界条件。

U1、U2、U3 用于指定三个方向的位移边界条件，UR1、UR2、UR3 用于指定三个方向

的旋转边界条件（指定转角值为弧度）。以上所有选项用于设置位移约束，可选择一个或多个自由度，选择之后默认为 0。如图 6-9 所示，表示 1 方向的位移为 0，2 方向的指定位移为 1，其他方向不约束。



图 6-9　编辑边界条件（1）



图 6-10　编辑边界条件（2）

幅值（Amplitude）：该下拉列表用于选择边界条件随时间/频率变化的规律，与施加集中力时的设置方法相同，此处不再赘述。该列表仅在“方式”中选择“指定约束”并在“分布”中选择“一致”时被激活。

完成边界条件的设置后，单击工具区右侧的“边界条件管理器”（Boundary Condition Manager）工具，可见边界条件管理器内列出了已创建的边界条件。该管理器的用法与“载荷管理器”（Load Manager）相同，此处不再赘述。

6.3　本章小结

本章为读者讲解了 ABAQUS 中的载荷、边界条件的定义方法，这两者都在载荷（LOAD）模块中进行定义。

到了这一个模块，即意味着模型可以“动”了，系统可以运作了。通过合理的约束，可以使经过合理简化的模型达到复杂的原始模型的近似或者相同的效果。

加载方案的制定充分体现了用户的力学及有限元基础知识的水平。对加载过程的一个简单的调整，可以在满足精度要求的条件下，极大地提高迭代收敛速度，反过来，加载过程中的一个极小失误也可以导致不收敛、分析失败。

载荷模块是在分析过程中最容易出现失误的步骤，用户在出现问题时，应首先重点关注，反复核查。



第 7 章 网 格 划 分

“网格”（Mesh）模块主要用于几何模型的网格划分，是决定分析精度的重要环节。在创建部件（适用于非独立实体）或装配件（适用于独立实体）后，无论是否进行了属性（Property）、相互作用（Interaction）及载荷（Load）等功能模块的设置工作，都可以在网格模块中进行网格划分，而无须按模块的排列顺序一一处理。

本章学习目标

- 掌握种子的概念
- 掌握种子的使用方法
- 掌握进行网格控制的方法
- 掌握单元族中主要单元类型的使用方法

7.1 种子（SEED）

种子是单元的边结点在区域边界上的标记，它决定了网格的密度。主菜单中的“布种”菜单及工具区中的展开工具箱用于模型的布种操作。

7.1.1 为部件实例布种

启动 ABAQUS/CAE，打开本节示例文件夹中的模型数据库 ex7.1.cae，模型数据库中有如图 7-1 所示的衬套模型。

对于非独立实体，在创建了部件后就可以在“网格”（Mesh）功能模块中对该部件进行网格划分。进入“网格”（Mesh）模块后，首先将环境栏的“对象”（Object）选择为“部件”（Part），并在“部件”（Part）列表中选择要操作的部件，本例中为 Bush。

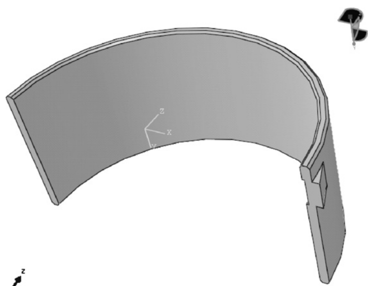


图 7-1 衬套

按住工具区中的“种子部件”（Seed Part）工具，在展开工具条中选择设置种子的工具；或在主菜单的“布种”菜单中进行选择。该展开工具条从左到右分别为：。

- 对整个部件撒种子，显示为白色。用户也可以选择“布种（Seed）→部件（Part）”命令实现该操作。
- 删除使用“为边布种→按个数”、“为边布种→按尺寸”、“为边布种→渐变”工具设置的种子，而不会删除使用“种子部件”（Seed Part）工具设置的种子。用户也可以选择“布种（Seed）→删除边上的种子（Delete Edge Seeds)”命令实现该操作。

单击，弹出图 7-2 所示的“全局种子”对话框，若为独立实体，需要先在视图区选择部件实体。

■ 近似全局尺寸（Approximate global size）：该栏用于输入大致的单元尺寸，将该尺寸运用于整个部件。ABAQUS/CAE 会自动调整单元尺寸，让该部件中每条边上的种子均匀分布。本例中输入 3.9。

■ 曲率控制（Curvature control）：用于控制曲边的种子设置。本例采用默认设置。

● 最大偏离因子（0.0<h/L<1.0）（Deviation factor）：该系数为单元的边与曲边的最大偏差和单元边长的比值，表示单元的偏差程度。偏差系数越小，曲边上的种子越多。该系数的取值范围为 0~1，默认值为 0.1，相当于对一个圆周大约划分为 8 个单元。

■ 最小尺寸控制（Minimum size factor）：该系数为近似全局尺寸（Approximate global size）的分数，用于控制最小的单元尺寸，避免在不关心的高曲率区域划分过多的单元。该系数的取值范围为 0~1，默认值为 0.1，即最小的单元尺寸为整体单元尺寸的 0.1。

单击“确定”，完成布种如图 7-3 所示。



图 7-2 “全局种子”对话框

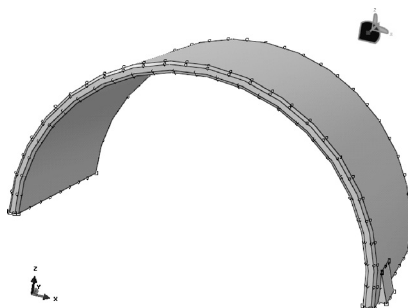


图 7-3 完成布种

7.1.2 为边布种

单击，在视图区中选择要布种的边，如图 7-4 所示选择布种对象，单击中键，弹出图 7-5 所示的“局部种子”对话框。

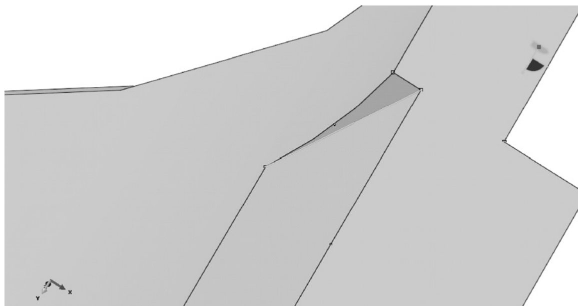


图 7-4 选择布种对象

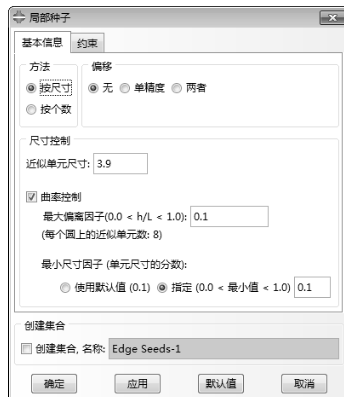


图 7-5 局部种子（按尺寸）

在图 7-5 所示的“局部种子”对话框中用户可以选择定义局部种子的方式，类似于

ANSYS 中的全局单元尺寸与局部单元尺寸的控制，全局种子定义了全局的单元尺寸或线被划分的分数，局部种子则可以在用户较为关心的对象上单独定义单元尺寸或份数。

若用户删除已划分了网格的部件或实体的种子，则网格也被清除。类似地，若用户对已划分了网格的部件或实体重新设置种子，则网格同样会被清除。

当选择“按个数”定义局部种子时，图 7-5 所示的“局部种子”对话框变为图 7-6 所示的状态，输入单元个数为“5”，单击中键，完成局部布种如图 7-7 所示，注意线的变化。



图 7-6　局部种子（按个数）

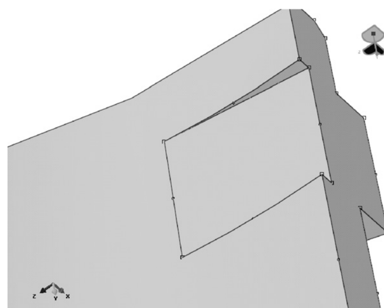


图 7-7　完成局部布种

7.2　网格控制

对于二维或三维结构，ABAQUS 可以进行网格控制，而对于梁、桁架等一维结构则无法进行网格控制。用户可以对网格形状进行控制、选择网格划分的技术和算法。

7.2.1 网格形状

单击工具区中的“指派网格控制属性”（Assign Mesh Controls）按钮，或执行“网格（Mesh）→控制（Controls）”命令，弹出“网格控制属性”（Mesh Controls）对话框，如图 7-8 所示。该对话框用于选择单元形状（Element Shape）、网格划分技术（Technique）和对应的算法（Algorithm）。

对于二维模型，可以选择四边形（Quad）、四边形优先（Quad-dominated）、三角形（Tri）三种单元形状。

- 四边形：模型的网格仅包含四边形单元。
- 四边形优先：模型的网格主要使用四边形单元，允许过渡区域出现三角形单元。
- 三角形：模型的网格仅包含三角形单元。

对于三维模型，可以选择六面体（Hex）、六面体优先（Hex-dominated）、四面体（Tet）、楔形（Wedge）四种单元形状。



图 7-8　网格控制属性

■ 六面体：模型的网格仅包含六面体单元。

■ 六面体优先：模型的网格主要使用六面体，允许过渡区域出现楔形（三棱柱）单元。

■ 四面体：模型的网格仅包含四面体单元。

■ 楔形：模型的网格仅包含楔形单元。

7.2.2 网格划分技术与算法

在“网格控制属性”（Mesh Controls）对话框中，可选择的基本网格划分技术有三种：结构（Structured）、扫掠（Sweep）和自由（Free）。对于二维或三维结构，这三种网格划分技术拥有各自的网格划分算法。另外两个选项“保持原状”（As is）和“重复”（Multiple）不是网格划分技术，而是对应于某些复杂结构的网格划分方案。只有当网格划分技术或方案对当前所选择区域可用时，它们才显示为可选择项。

如果 ABAQUS/CAE 无法使用选择的技术进行网格划分，则模型在视图区中显示为橙色。下面对各种网格划分技术及其算法进行介绍。

■ 结构网格划分技术（Structured）

将简单的、预先定义的规则形状的网格（例如正方形或立方体）转变到将要被划分网格的几何区域上。该技术适用于简单的二维区域及用六面体单元划分的简单的三维区域。一般情况下，该技术能够很好地控制 ABAQUS/CAE 产生的网格，但生成的网格往往会偏离种子。选用结构化网格划分技术的区域显示为绿色。

● 二维结构的结构化网格划分

对于二维结构，只有当模型区域内没有孔洞、孤立的边、孤立的点，且该区域包含 3~5 条逻辑边（如果包含虚拟拓扑，必须仅包含 4 条边）时，该区域才能被划分为结构化网格。该技术可以对二维结构划分四边形、四边形优先和三角形三种形状的单元。

“网格划分技术”（Technique）栏右侧包含以下两个选项：

最小化网格过渡（Minimize the mesh transition）：该选项用于减少从粗网格到细网格的过渡。默认为选择该项，在大多数情况下能够减少网格扭曲，提高网格质量，但生成的网格会更加偏离种子。该选项仅适用于四边形单元。

“重新定义区域角点”（Redefine Region Corners）：该按钮用于重新定义该区域的角点，ABAQUS/CAE 将为选择角点侧的边合并为逻辑边，可以改变结构化网格的模式。

首次单击该按钮，提示区出现“接受加亮显示的角点”（Accept Highlighted）和“重新选择角点”（Select New）两个按钮。若再次单击“重新定义区域角点”按钮，则提示区出现三个按钮，前两个按钮同上，第 3 个按钮“恢复到默认”（Revert to Defaults）表示恢复到默认设置的角点。

● 三维结构的结构化网格划分

对于三维结构，只有模型区域满足以下条件，才能被划分为结构化网格：

✧ 没有孔洞、孤立的面、孤立的边及孤立的点；

✧ 面和边上的弧度值小于 90°；

✧ 三维区域内的所有面均可以运用二维结构化网格划分方法；

✧ 区域内的每个顶点属于三条边；

✧ 至少有四个面（如果包含虚拟拓扑，必须仅包含六条边）；
✧ 各面之间要尽可能地接近 90°（如果面与面之间的角大于 150°，就应该对它进行分割）；
✧ 若三维区域不是立方体，每个面只能包含一个小面；若三维区域是立方体，每个面可以包含一些小面，但每个小面仅有四条边，且面被划分为规则的网格形状。

结构化网格划分技术可以对三维结构划分六面体和六面体优先单元。当选择六面体优先的情况时，ABAQUS/CAE 会提示将得到一个完全由六面体组成的网格。采用结构化网格划分技术时，可能出现网格的内部结点位于模型的几何区域之外的情况，特别是模型区域中包含凹入的边界时。如果生成这种网格，用户必须重新进行网格划分，方法有：

✧ 加密种子重新划分网格；
✧ 将模型分割成更小的且更规则的区域；
✧ 重新定义该区域的角点；
✧ 选择另外的网格划分技术。

■ 扫掠网格划分技术（Sweep）

ABAQUS/CAE 首先在起始边/面上生成网格，然后沿扫掠路径复制起始边/面网格内的结点，一次前进一个单元，直到目标边/面，从而得到该模型区域的网格。选用扫掠网格划分技术的区域显示为黄色。

为了确定一个区域是否可以使用扫掠网格划分技术，ABAQUS/CAE 要检测该区域是否能沿着从起始边/面到目标边/面的扫掠路径进行复制。一般情况下，ABAQUS/CAE 选择最复杂的边/面作为起始边/面，用户不可以自己选择起始边/面和目标边/面，但可以选择扫掠路径。

扫掠网格划分技术通常用于划分拉伸区域或旋转区域，当扫掠路径是直边或样条曲线时，得到的网格称为拉伸扫掠网格；当扫掠路径是圆弧时，得到的网格称为旋转扫掠网格。

● 二维结构的扫掠网格划分

对于二维结构，可以使用该技术划分四边形和四边形优先两种形状的单元。当起始边/面与旋转轴有一个交点时，必须使用四边形优先，因为网格划分时在交点处会产生一层三角形单元。

“网格划分技术”栏右侧仅包含“重新定义扫掠路径”（Redefine Sweep Path）按钮。若该区域包含多个有效的扫掠路径，单击该按钮，提示区出现三个按钮。

“接受加亮显示的角点”：该按钮用于接受加亮显示的角点。

“反向”：单击该按钮，扫掠路径反向，提示区出现两个按钮，单击“反向”按钮改变扫掠路径的方向，单击“确定”按钮确定该扫掠路径并回到“网格控制属性”对话框。

“选择新路径”：该按钮用于选择新的扫掠路径。单击该按钮在视图区选取边作为扫掠路径。

若该区域仅包含一个有效的扫掠路径，单击“重新定义扫掠路径”按钮。

● 三维结构的扫掠网格划分

对于三维结构，只有模型区域满足以下条件，才能被划分为扫掠网格：

✧ 连接起始面和目标面的每个面（称为连接面）只包含一个小面，且不含有孤立的边或点；
✧ 目标面仅包含一个小面，且没有孤立的边或点；
✧ 若起始面包含两个及两个以上的小面，则这些小面间的角度接近 180°；

✧ 每个连接面由四条边组成，边之间的角度接近 90°；
✧ 每个连接面与起始面、目标面之间的角度接近 90°。

此外，如果旋转体区域与旋转轴相交，则不能使用扫掠网格划分技术；如果被划分区域的一条或多条边位于旋转轴上，ABAQUS/CAE 不能用六面体或楔形单元对该区域进行扫掠网格划分，而必须选择六面体优先形状的单元；当扫掠路径是一条封闭的样条曲线时，该样条曲线必须被分割为两段或更多。

用户可以使用扫掠网格划分技术划分六面体、六面体优先和楔形单元。

ABAQUS/CAE 首先在起始面上采用自由网格划分技术分别划分四边形、四边形优先、三角形三种形状的单元，然后沿扫掠路径复制起始面内的结点，直到目标面，分别得到三种形状的网格。

对于三种形状的单元，“网格划分技术”栏右侧包含的内容不尽相同，下面分别进行介绍。

● 六面体单元
✧ 算法（Algorithm）：该栏用于选择网格划分算法。
✧ 中轴算法（Medial axis）：此为默认算法。ABAQUS/CAE 首先将要进行网格划分的区域分解为一系列简单的区域，然后使用结构化网格划分技术对这些区域进行划分。使用该算法，生成的网格往往会偏离种子，但单元形状较为规则。如果区域的形状较简单且包含较多的单元，则使用该算法划分网格比使用进阶算法（Advancing front）更快。
✧ 最少网格过渡（Minimize the mesh transition）：该选项用于减少从粗网格到细网格的过渡。默认为选择该项。
✧ 进阶算法（Advancing front）：先在区域边界上生成六面体单元，接着逐步在区域内部生成六面体单元，最终完成网格划分。使用该算法，生成的网格与种子吻合得较好，产生较为均匀的网格，但在狭窄的区域可能导致网格的歪斜。当模型包含多个相连的区域时，使用进阶算法可以减少由于各区域内结点分布的不同而导致的分界面网格的不规则。若模型区域包含虚拟拓扑或不精确的部分，则只能使用进阶算法进行网格划分。
✧ 如果可能则使用映射网格（Use mapped meshing where appropriate）：映射网格划分是结构化网格划分的子集，是结构化网格应用于二维四边形区域的特殊情况。选择该选项，ABAQUS/CAE 首先判断映射网格划分能否提高该四边形区域的网格质量；若能，则 ABAQUS/CAE 略微调整种子，使该区域中对边具有相同数量的种子，进而运用映射网格划分（Mapped meshing）。当复杂的结构包含简单几何形状的面时，特别是狭长的四边形面时，选择该选项通常能提高网格质量。
✧ 重新定义扫掠路径（Redefine sweep path）：该按钮用于重新定义扫掠路径，其用法与二维结构的扫掠网格划分相同，在此不再赘述。

● 六面体优先单元
✧ 算法：该栏用于选择网格划分算法。
✧ 中轴算法：如前所述，采用中轴算法进行网格划分，但不包含“最少网格过度”项。

✧ 进阶算法：此为默认算法，设置与六面体单元相同，仍包含如果可能则“使用映射网格”项，在此不再赘述。

✧ 重新定义扫掠路径：该按钮用于重新定义扫掠路径，其用法与二维结构的扫掠网格划分相同，在此不再赘述。

● 楔形单元

仅包含“重新定义扫掠路径”按钮。

■ 自由网格划分技术（Free）

自由网格划分技术具有很强的灵活性，适用于划分形态非常复杂的模型区域。在网格生成之前，不能对所划分的网格模式进行预测。选用自由网格划分技术的区域显示为粉红色。

● 二维结构的自由网格划分

对于二维结构，可以使用该技术对平面或曲面划分四边形、四边形优先和三角形三种形状的单元。对于三种形状的单元，其“算法”栏包含的内容不尽相同，下面分别进行介绍。

✧ 四边形单元

◆ 中轴算法：同六面体扫掠网格划分，此为默认算法。

◆ 最少网格过渡：同六面体扫掠网格划分，默认选择该项。

◆ 进阶算法：同六面体，该栏用于选择进阶算法划分网格，包含“如果可能则使用映射网格”。

✧ 四边形优先单元

◆ 中轴算法：同六面体优先扫掠网格划分，该栏用于选择中轴算法划分网格。

◆ 进阶算法：同六面体优先扫掠网格划分，此为默认算法，仍包含“如果可能则使用映射网格”项。

◆ 三角形单元：仅包含“如果可能则使用映射网格”项。

● 三维结构的自由网格划分

对于三维结构，仅能使用该技术划分四面体单元。ABAQUS/CAE 首先在模型区域的外部表面划分三角形网格，再用这些三角形网格生成内部的四面体单元。“网格控制属性”对话框中的算法设置不同于二维结构的自由网格划分。

✧ 使用默认算法（Use default algorithm）：该栏用于选择默认的网格划分算法。此默认算法适用于绝大多数模型，特别是具有复杂形状或狭窄的区域。若不选择该项，ABAQUS/CAE 使用前一步设置中的算法进行网格划分。

✧ 增加内部单元尺寸（Increase size of interior elements）：如果模型的网格密度足够且重点分析区域位于边界，用户可以选择该选项来增加内部单元的尺寸，提高计算效率。

✧ 适当增加尺寸（Moderate growth）：该选项用于适当增加内部单元的尺寸。

✧ 最大增加尺寸（Maximum growth）：该选项用于最大程度地增加内部单元的尺寸。

✧ 如果可能则使用四面体向边界面映射（Use mapped tri meshing on bounding faces where appropriate）：类似于之前介绍的“如果可能则使用映射网格”项。选择该选项，ABAQUS/CAE 首先判断映射网格划分能否提高边界面的网格质量；若能，对

这些边界面运用映射网格划分代替自由网格划分，进而得到四面体单元。

■ 重复（Multiple）和保持原状（As is）

用户单击工具区中的“分配网格控制”（Assign Mesh Controls）工具，选择模型的几个区域，并在“网格控制属性”对话框中改变单元形状（Element Shape）。

7.2.3 网格控制注意事项

（1）如果模型的几个区域能用不同的技术进行网格划分，“技术”栏的“重复”被激活，且 ABAQUS/CAE 会自动选择该选项，将各区域的网格划分技术改变为适合的类型。

（2）若用户对模型进行了分割，且分割后的区域可以用不同的技术进行网格划分，则 ABAQUS/CAE 会自动采用适合于各区域的网格划分技术，即采用“重复”网格划分方案。

（3）用户单击工具区中的“分配网格控制”工具，选择模型的几个区域，而之前已在这些区域设定了多重网格划分技术（“重复”），打开的“网格属性控制”（Mesh Controls）对话框中“技术”栏的“保持原状”被激活，且 ABAQUS/CAE 会自动选择该选项。

（4）对于不能采用结构化技术和扫掠技术进行网格划分的复杂结构，用户可以运用“分割”（Partition）工具将其分割成形状较为简单的区域，并对这些区域进行结构化或扫掠网格划分。如果模型不容易分割或分割过程过于繁杂，用户可以选用自由网格划分技术。

（5）采用映射网格划分能得到高质量的网格，但 ABAQUS/CAE 不能直接采用映射网格划分技术，只能通过“如果可能则使用映射网格”选项让程序选择映射网格划分的区域。在以下几种情况，用户可以选择该项进行映射网格划分：采用自由网格划分技术和进阶算法，对二维结构划分四边形或四边形优先的单元（2D+Quad/Quad-dominated+Free+Advancingfront）、采用自由网格划分技术对二维结构划分三角形的单元（2D+Tri+Free）、采用扫掠网格划分技术和进阶算法，对三维结构划分六面体或六面体优先的单元（3D+Hex/Hex-dominated+Sweep+Advancing front）、采用自由网格划分技术，对三维结构划分四面体的单元（3D+Tet+Free）。

（6）中轴算法和进阶算法是主要的 ABAQUS 网格划分算法，有四种单元形状（Element Shape）和网格划分技术（Technique）的组合能选用这两种算法：采用自由网格划分技术对二维结构划分四边形单元（2D+Quad+Free）和采用扫掠网格划分技术对三维结构划分六面体单元（3D+Hex+Sweep）默认选择中轴算法，采用自由网格划分技术，对二维结构划分四边形优先的单元（2D+Quad-dominated+Free）和采用扫掠网格划分技术对三维结构划分六面体优先单元（3D+Hex-dominated+Sweep）默认选择进阶算法。对于不同的模型，用户应该比较这两种算法，得到合适的网格。

（7）若用户重新设置已划分了网格的区域的网格控制选项，则该区域内的网格会被清除。

7.3 单元族

ABAQUS 有各种各样的单元，构成了庞大的单元库。可扩展的单元库为使用者提供了一套强大的工具，可以解决许多不同类型的问题。本节主要介绍影响单元特性的五个方面的问题。

7.3.1 单元的表征

每一个单元都由下面几个特性来表征：

- 单元族
- 自由度（和单元族直接相关）
- 结点数
- 数学描述，即单元列式
- 积分

ABAQUS 中每一种单元都有自己特有的名字，例如 T2D2，S4R 和 C3D81。单元的名字标志着一种单元的五个特性。单元命名的规则将在下面说明。

■ 单元族

图 7-9 给出了应力分析中最常用的单元族。单元族之间一个明显的区别是每一个单元族所假定的几何类型不同。

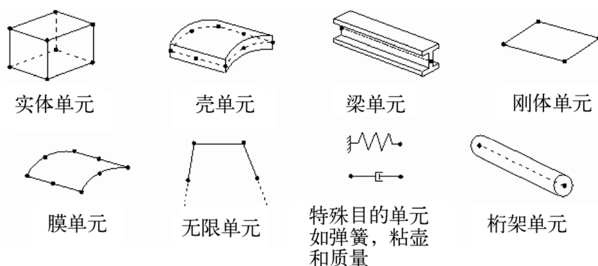


图 7-9　常用单元族

本书用到的单元族有实体单元、壳单元、梁单元、桁架单元及刚体单元等，这些将在以后的章节里详细讨论。其他的单元族读者可参阅用户手册中的相关内容。

单元名字里的开始字母标志着这种单元属于哪一个单元族。例如，S4R 中的 S 表示它是壳单元，C3D81 中的 C 表示它是实体单元。

■ 自由度

自由度（dof）是分析中计算的基本变量。不同的分析模块中，自由度各不相同。对于壳和梁单元的应力/位移模拟分析，自由度是每一结点处的平动和转动；对于热传导模拟分析，自由度为每一结点处的温度。因此，热传导分析要求应用与应力分析不同的单元，因为它们的自由度不同。

ABAQUS 中自由度的排序规则如下：

- 1：1 方向的平动
- 2：2 方向的平动
- 3：3 方向的平动
- 4：绕 1 轴的转动
- 5：绕 2 轴的转动
- 6：绕 3 轴的转动
- 7：开口截面梁单元的翘曲

- 8：声压或孔隙压力
- 9：电势
- 11：温度（或物质扩散分析中归一化浓度），对梁和壳，指厚度方向第一点温度
- 12：梁和壳厚度上其他点的温度

其中：方向 1，2，3 分别对应于整体坐标的 1、2 和 3 方向，除非已经在结点处定义了局部坐标系。

轴对称单元是一个例外，其位移和转动自由度指的是：

- 1：r-方向的平动
- 2：z-方向的平动
- 3：r-z 平面内的转动

其中：方向 r 和 z 分别对应于整体坐标的 1-和 2-方向，除非已经在结点处定义了局部坐标系。

■ 结点数——插值的阶数

ABAQUS 仅在单元的结点处计算位移或任何其他的自由度。在单元内的任何其他点处，位移是结点位移插值获得的。通常插值的阶数由单元采用的结点数决定。

仅在角点处存在结点的单元，例如图 7-10 所示的 8 结点实体单元，在每一方向上采用线性插值，因此常常称这类单元为线性单元或一阶单元。

具有边中点结点的单元，如图 7-11 所示的 20 结点实体单元，采用二次插值，因此常常被称为二次单元或二阶单元。一般情况下，单元的结点数在其名字中进行标记。例如，C3D8 为 8 结点实体单元；S8R 为 8 结点一般壳单元。梁单元族的记法稍有不同：插值的阶数在单元的名字中标记。例如，一阶三维梁单元叫做 B31，而二阶三维梁单元叫做 B32。

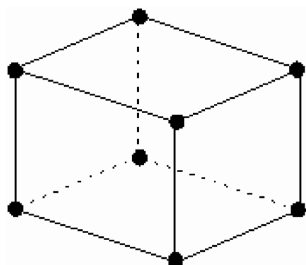


图 7-10　8 结点实体单元

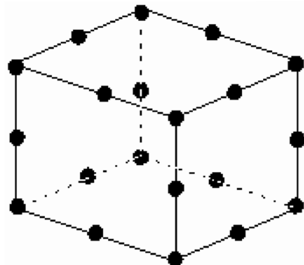


图 7-11　20 结点实体单元

■ 单元列式

单元列式是指用来定义单元行为的数学理论。ABAQUS 中所有的应力/位移单元行为都是基于拉格朗日或物质描述的：在整个分析过程中和一个单元相关的物质保持和这个单元相关，而且物质不能穿越单元边界。在欧拉或空间描述中，单元在空间固定，而物质在单元之间流动。欧拉方法通常用于流体力学分析。ABAQUS 运用欧拉方法来模拟对流换热。

为了适用于不同类型的物理行为，ABAQUS 中的某些单元族包含具有几种不同列式的单元。例如，壳单元族有三个类别：具有一般壳体理论的列式，具有薄壳理论的列式，具有

厚壳理论的列式。

某些单元族除了有标准的列式，还有一些其他供选择的列式。具有其他供选择列式的单元可以由其单元名字末尾的附加字母来识别。例如，实体、梁和桁架单元族包括了杂交单元列式，杂交单元由其名字末尾的“H”字母标识（如 C3D8H 和 B31H）。

有些单元列式可求解耦合场问题。例如以字母 C 开头和字母 T 结尾的单元（如 C3D8T）具有力学和热学自由度，可用于力-热学耦合问题的仿真计算。几个最常用的单元列式会在下文讨论。

■ 积分

ABAQUS 应用数值技术积分每一单元体上各种变量。对于大部分单元，ABAQUS 运用高斯积分方法来计算单元内每一个高斯点处的物质响应。对实体单元，有全积分和减缩积分两种选择，选择结果将影响单元精度。

ABAQUS 在单元名字末尾用字母“R”来识别减缩积分单元，对杂交单元，末尾字母为 RH。例如，CAX4 是全积分、线性、轴对称实体单元；而 CAX4R 是减缩积分、线性、轴对称实体单元。

7.3.2 实体单元

在 ABAQUS 的单元库中，应用最广泛的是应力/位移实体单元族。对三维单元，可以选择六面体、四面体和楔形体；对二维单元则可在三角形与四边形之间进行选择。

这些基本的单元形状，每一种都有线性和二次两类选择。对六面体和四边形，还可选择完全积分或减缩积分。

最后，还可选用标准单元或杂交单元列式。另外对线性六面体或四边形单元，还有个附加的功能，可选择非协调模式，而对二次的三角形或四面体单元可以应用修正列式。

若列出所有种类的单元，实体单元的总数目是相当大的，仅三维单元而言就超过 20 种。模拟的精度将强烈地依赖于所采用的单元类型。

在不同的单元族中，实体（连续体）单元能够模拟的构件种类最多。从概念上讲，实体单元仅模拟部件中的一小块物质。由于实体单元可以在其任何表面与其他单元连接起来，就像建筑物中的砖或马赛克镶嵌中的瓷砖一样，因此能用来建造几乎任何形状，承受任意载荷的模型。

在 ABAQUS 中应力/位移实体单元的名字以字母“C”开头。随后的两个字母表示单元的维数，即单元的自由度数，但有时有例外。字母“3D”表示三维单元；“AX”表示轴对称单元；“PE”表示平面应变单元，而“PS”则表示平面应力单元。

■ 三维实体单元库

三维实体单元可以是六面体形、楔形或四面体形。三维实体单元的完整清单和每一类单元的结点布局可以查阅 ABAQUS/Standard 用户手册的相关章节。

■ 二维实体单元库

ABAQUS 拥有几类离面行为互不相同的二维实体单元。二维单元可以是四边形或三角形。最常用的三类二维单元如图 7-12 所示。

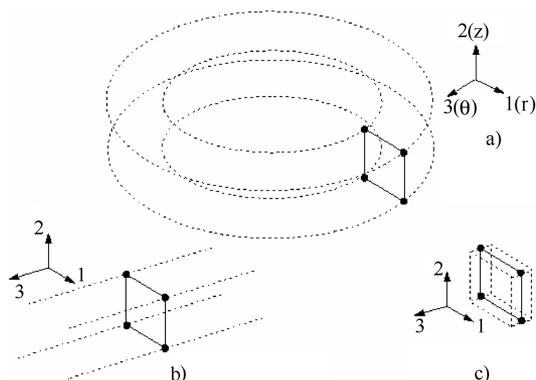


图 7-12　常用二维实体单元

a) 轴对称单元 CAX4　b) 平面应变单元 CPE4　c) 平面应力单元 CPS4

平面应变单元假定离面应变ε_{33}为零；这类单元可以用来模拟厚结构。

平面应力单元假定离面应力σ_{33}为零；这类单元适合于用来模拟薄结构。

无扭曲的轴对称单元，即“CAX”类单元，可模拟 360° 的环；这类单元适合于分析受轴对称截荷作用，又具有轴对称几何形状的结构。

此外，ABAQUS 也提供了广义平面应变单元、可以发生扭曲的轴对称单元和反对称变形的轴对称单元。

广义平面应变单元包括了附加的广义列式。离面应变可以随着模型平面内的位置线性变化。这种单元列式特别适合于厚截面的热应力分析。

可以发生扭曲的轴对称单元用来模拟初始时为轴对称形状，但能沿对称轴发生扭曲的物体。这些单元对于模拟圆柱形结构，例如轴对称橡胶套管的扭转很有用。

反对称变形的轴对称单元则用来模拟初始为轴对称几何形状的反对称变形物体。它们适合于模拟受剪切载荷作用的轴对称橡胶支座一类的问题。

二维实体单元必须在 1-2 平面内定义，并使结点编号绕单元周界逆时针旋转，如图 7-13 所示。当用前处理器产生网格时，要确保所有点处的单元法线方向一致，即都在整体坐标的 3 轴正方向上。不能提供正确的单元结点布局将引起 ABAQUS 给出单元有负面积的出错信息。

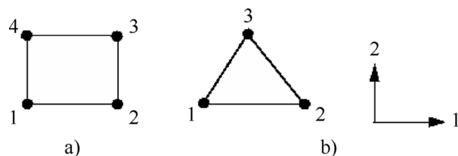


图 7-13　二维实体单元的结点布局

a) 四边形单元　b) 三角形单元

■ 自由度

所有的应力/位移实体单元在每一结点处有平动自由度。相应地，自由度 1、2 和 3 在三维单元中是有效的，而在平面应变单元、平面应力单元和无扭曲轴对称单元中只有自由度 1 和自由度 2 是有效的。其他二维实体单元中有效的自由度可查阅相关帮助文件。

■ 单元性质

所有的实体单元必须赋予截面性质，它定义了材料性质和与单元相关的附加几何数据。三维单元和轴对称单元不需要附加几何信息，结点坐标就能够完整地定义单元的几何形状。而平面应力和平面应变单元则必须指定单元的厚度，它们的默认值为 1。

■ 单元列式和积分

实体单元族有若干可选择的单元列式，包括非协调模式的列式和杂交单元列式，实体单元可以应用完全积分或减缩积分。单元列式和积分类型对实体单元的精度都会产生显著的影响。

单元阶数（线性或二次），单元列式及积分水平等因素对结构的模拟精度有影响。图 7-14 所示，是评估一个给定单元性能的经典测试。因为该构件相对细长，通常用梁单元来对它建立模型。但在这里用这个测试来帮助评估各种实体单元的效率。图中梁长 150mm，宽 2.5mm，高 5mm；一端固定；自由端承受 5N 的荷载。材料的杨氏模量 E 为 70GPa，泊松比为 0.0。采用梁的理论，在载荷 P 作用下，梁自由端的挠度为

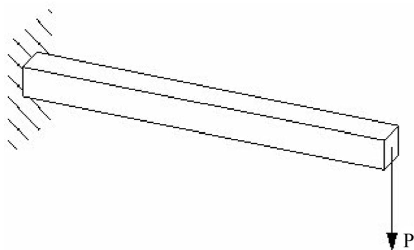


图 7-14　自由端受集中载荷的悬臂梁

$$\delta_{tip} = \frac{Pl^3}{3EI} \tag{7-1}$$

式中　$I=bd^3/12$；

l——梁的长度；

b——梁的宽度；

d——梁的高度。

P=5N 时自由端挠度是 3.09mm。

● 完全积分

所谓“完全积分”是指当单元具有规则形状时，所用的 Gauss 积分点的数目足以对单元刚度矩阵中的多项式进行精确积分。对六面体和四边形单元而言，所谓“规则形状”是指单元的边相交成直角，而任何的结点位于边的中点。

线性单元如要完全积分，则在每一方向需要两个积分点。因此，三维单元 C3D8 在单元中排列了 2×2×2 个积分点。而二次单元如要完全积分，则在每一方向需要 3 个积分点。在完全积分的二维四边形单元中积分点的位置如图 7-15 所示。

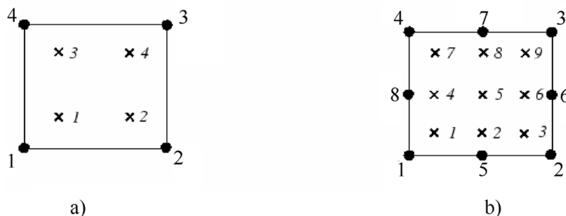


图 7-15　积分点的位置

a) 线性单元（例：GPS4）　b) 二次单元（例：GPS8）

如图 7-16 所示，这里采用了几种不同的有限元网格来对悬臂梁问题进行模拟。模拟采

用了线性或二次的完全积分单元，并说明了单元阶数（一阶与二阶）和网格密度对结果精度的影响。表 7-1 列出了不同网格情况下自由端位移与梁的理论解 3.09mm 的比值。

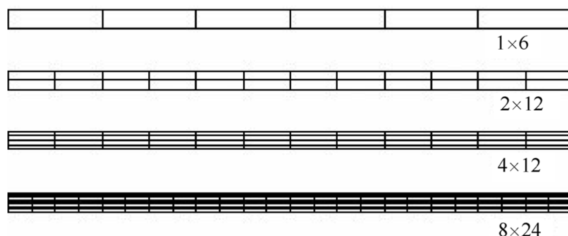


图 7-16　悬臂梁模拟所采用的网格

表 7-1　完全积分单元的梁挠度比值

单　元	网格尺寸（高度×长度）			
	1×6	2×12	4×12	8×24
CPS4	0.074	0.242	0.242	0.561
CPS8	0.994	1.000	1.000	1.000
C3D8	0.077	0.248	0.243	0.563
C3D20	0.994	1.000	1.000	1.000

正如已经看到的，剪力锁闭使单元在弯曲时过于刚硬。可作如下解释：考虑一个受纯弯的结构中的一小块材料，材料将产生的弯曲如图 7-17 所示。开始时平行于水平轴的直线按正常曲率弯曲，而厚度方向的直线将保持为直线。水平线与竖直线之间的夹角保持不变。

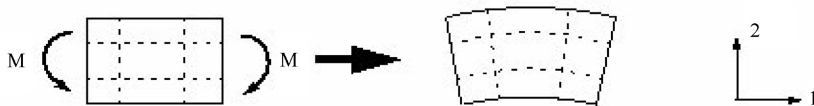


图 7-17　受弯曲材料的变形

因为线性单元的边不能弯曲，所以如果用单个单元来模拟小块材料，则其变形后的形状如图 7-18 所示。出现这个伪剪应力的原因是单元的边不能弯曲。它的存在意味着应变能导致剪切变形，而不是导致弯曲变形，其结果导致总的挠度变小了，即单元太刚硬了。剪力锁闭只影响受弯曲载荷的完全积分线性单元，这些单元的功能在受纵向或剪切荷载时并没有问题。

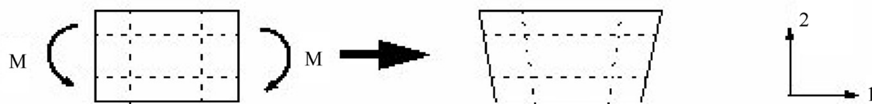


图 7-18　受弯曲的完全积分线性单元的变形

而二次单元的边界可以弯曲如图 7-19 所示，故它没有剪力锁闭的问题。

对表 7-1 所示的二次单元，计算所得的自由端位移接近于理论解。但是，如果二次单元扭曲或弯曲应力有梯度，则也可能出现某些锁闭现象，而这两种情况在实际问题中是可能发生的。

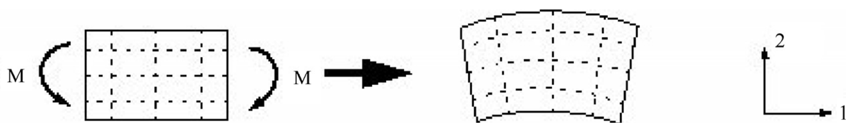


图 7-19 受弯曲的完全积分二次单元的变形

因此，只有在确认载荷将产生小弯曲时，才可采用完全积分的线性单元。而如果对载荷产生的位移类型有怀疑，则应采用不同的单元类型。在复杂应力状态下，完全积分的二次单元也可能发生锁闭。因此如果在模型中有此类单元，则应细心地检查计算的结果。但是，对于局部应力集中问题，完全积分的线性单元是非常有用的。

● 减缩积分

减缩积分单元比完全积分单元在每个方向少用一个积分点。减缩积分的线性单元只在单元中心有一个积分点（实际上，在 ABAQUS 中这些一阶单元采用了更精确的均匀应变公式，单元计算时，采用了其应变分量的平均值。由于在这里该区别并不重要，因此忽略该情况。)。只有四边形和六面体单元才能采用减缩积分；而所有的楔形体、四面体和三角形实体单元只能采用完全积分，即使它们与减缩积分的六面体或四边形单元用在同一个网格中。对减缩积分四边形单元，其积分点的位置如图 7-20 所示。



图 7-20 采用减缩积分的二维单元的积分点

a) 线性单元（例：GPS4R） b) 二次单元（例：GPS8R）

利用前叙的四类单元，即如图 7-16 所示的四种有限元网格，通过减缩积分来对悬臂梁问题进行计算，其结果列于表 7-2。

表 7-2 减缩积分单元的梁挠度比值

单　　元	网格尺寸（高度×长度）			
	1×6	2×12	4×12	8×24
CPS4R	20.3	1.308	1.051	1.012
CPS8R	1.000	1.000	1.000	1.000
C3D8R	70.1	1.323	1.063	1.015
C3D20R	1.000	1.000	1.000	1.000

线性的减缩积分单元由于存在着所谓沙漏（hourglassing）的数值问题而过于柔软。单个减缩单元模拟受纯弯载荷的小块材料如图 7-21 所示。单元中虚线的长度均没有改变，并且它们的夹角也没有改变，这意味着在单元单个积分点上的所有应力分量都为零。由于单元变形没有产生应变能，所以这种弯曲的变形模式是一个零能量模式。由于单元在此模式下没有

刚度，所以不能抵抗此种形式的位移。在粗网格中，这种零能量模式会通过网格扩展出去，从而产生无意义的结果，这就是所谓的沙漏问题。



图 7-21　受弯曲的减缩积分线性单元的位移

可在 ABAQUS 中对减缩积分单元引入少量的人工“沙漏刚度”以限制沙漏模式的扩展。当模型中有更多的单元时，这种刚度在限制沙漏模式方面是更有效的，这意味着只要采用合理的细网格，线性减缩积分单元会给出可接受的结果。

对许多应用而言，采用细网格的线性减缩积分单元所产生的误差是在一个可接受的范围内的。这个结果说明当用这类单元来模拟承受弯曲载荷的结构时，在厚度方向上至少应采用四个单元。当在梁的厚度方向只有一个线性减缩积分单元时，所有的积分点都位于中性轴上，从而该模型将不能抵抗弯曲载荷。因为线性减缩积分单元对变形的鲁棒性，因此可在变形很大的模拟中采用剖分较细的此类单元。

二次减缩积分单元也有沙漏模式。然而在正常网格中这种模式几乎不可能扩展出去，并且在网格足够细时基本上不会造成什么问题。

由于沙漏问题，C3D20R 单元的 1×6 网格计算发散；若在宽度方向上变为两个单元，即 2×6 网格，就不会发散；但对于更细的网格，即便在宽度方向上只有一个单元也不会发散。即使在复杂应变状态下，二次减缩积分单元对锁闭并不敏感。因此一般来说，除了大应变的大位移问题和一些接触分析问题外，二次减缩积分单元是应力/位移模拟最佳选择。

● 非协调单元

非协调单元是克服完全积分的一阶单元的剪力锁闭问题的一种尝试。既然剪力锁闭是由于单元的位移场不能模拟与弯曲相关的运动学而引起的，那么可以考虑把增强单元变形梯度的附加自由度引入到一阶单元中去。

对变形梯度的加强使一阶单元的变形梯度呈线性变化，见图 7-22。在标准单元列式中，变形梯度在单元中是常量，见图 7-23，故标准单元列式必然导致与剪力锁闭相关的非零剪切应力。变形梯度的增强完全是在单元内部的，与边结点无关。

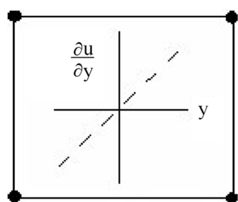


图 7-22　移梯非协调单元（增强位移梯度）

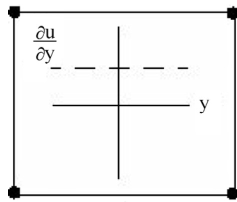


图 7-23　用标准构造的一阶单元

与直接增强位移场的非协调模式的单元列式不同，在 ABAQUS 中所采用的列式不会导致图 7-24 那样的两个单元交界处的重叠或裂隙，进而 ABAQUS 中的非协调单元列式很容易拓展到非线性有限应变模拟以及某些难以采用增强位移场的场合。ABAQUS 对非协调单元采用了增强位移梯度形式。

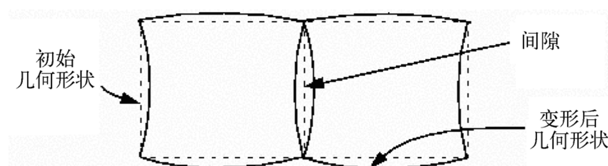


图 7-24 用增强位移场而不是增强位移梯度所导致的非协调单元的可能运动非协调性

在弯曲问题中，非协调单元可得到与二次单元相当的结果，而计算时间却明显降低。但非协调单元对单元扭曲很敏感。图 7-25 表示用有意扭歪的非协调单元来模拟悬臂梁：一种情况是“平行”扭歪，另一种是“交错”扭歪。

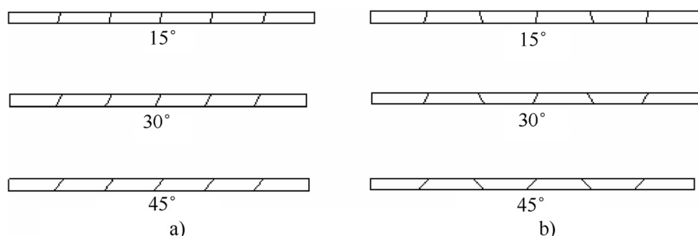


图 7-25 非协调单元的扭歪网格

a) 平行扭歪 b) 交错扭歪

图 7-26 给出了悬臂梁模型的自由端位移相对于单元扭歪水平的曲线。图中比较了三类平面应力单元：完全积分的线性单元、减缩积分的二次单元以及线性非协调单元。

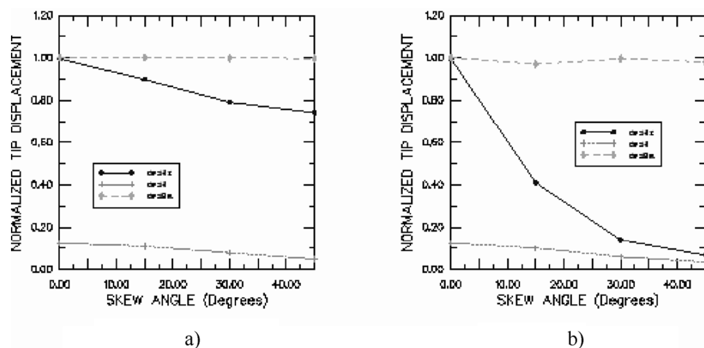


图 7-26 平行和交错扭曲对非协调单元的影响

a) 平行扭歪 b) 交错扭歪

由图 7-26 可以看出，完全积分的线性单元的结果较差。而减缩积分的二次单元则给出了很好的结果，直到单元扭歪得很严重时其结果才会恶化。

当非协调单元是矩形时，即使在悬臂的厚度方向只有一个单元，也能给出与理论值十分相近的结果。但是即使很小的交错扭歪也使单元过于刚硬。平行扭歪也降低了单元的精度，但程度较小。

如果应用得当，非协调单元在很短计算期内仍可得到较高的精度。但是必须注意保证单元扭歪是非常小的，然而当网格较复杂时这一点是很难保证的；因此，对于具有这种几何形状的模型，应再次考虑应减缩积分的二次单元，因为它们对网格扭歪并不敏感。

● 杂交单元

ABAQUS 中的每一种实体单元，包括所有的减缩积分单元和非协调单元，都有杂交单元列式。杂交单元名字前标有字母“H”。

对不可压缩材料（泊松比＝0.5）或非常接近于不可压缩的材料（泊松比>0.495）问题需采用杂交单元。橡胶就是具有不可压缩性质的材料的例子。不能用常规单元来模拟不可压缩材料的响应（除了平面应力情况），这是因为在单元中的压应力是不确定的。现在考虑均匀静水压力作用下的一个单元，如图 7-27 所示。

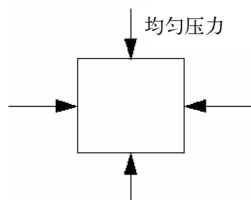


图 7-27　静水压

如果材料不可压缩，其体积在载荷作用下并不改变。因此压应力不能由结点位移计算，对于具有不可压缩材料性质的单元，一个纯位移列式是不适用的。

杂交单元包含一个可直接确定单元压应力的附加自由度。其结点位移只用来计算偏（剪）应变和偏应力。

■ 单元输出变量

应力和应变这样的默认单元输出变量是参照整体直角（笛卡儿）坐标系的。因此，图 7-28a 所示的积分点处应力分量σ_{11}是作用在整体坐标的 1 轴方向的。即使在一个大变形分析中单元发生转动（如图 7-28b 所示），仍默认是在整体笛卡儿坐标系中定义单元变量，然而，ABAQUS 允许用户为单元变量定义一个局部坐标系。

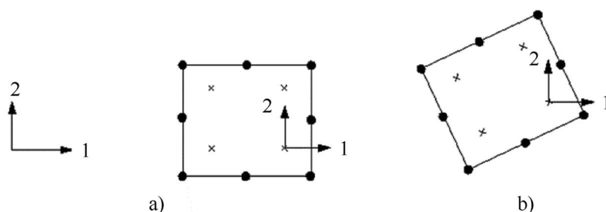


图 7-28　单元的材料方向

该局部坐标系在大变形分析中随着单元的运动而转动。当所分析的物体有自然材料方向时（如复合材料中的纤维方向），局部坐标系会十分有用。

■ 选择实体单元

对某一具体的模拟计算，如果想要以适当的计算时间达到精确的结果，则正确地选择单元是非常关键的。在使用 ABAQUS 的经验日益丰富时，毫无疑问每个用户会建立起自己的单元选择准则来解决具体问题，但若是刚开始使用 ABAQUS，则可考虑下面的建议。

● 如果不需要模拟非常大的应变或进行复杂的，需改变接触条件的问题，则应采用二次减缩积分单元（例如，CAX8R、CPE8R、CPS8R 和 C3D20R 等）。
● 如果存在应力集中，则应在局部采用二次完全积分单元（例如，CAX8、CPE8、CPS8 和 C3D20 等）。它们可用最短的计算时间提供应力梯度最好的解答。
● 涉及有非常大的网格扭曲问题（大应变分析）时，建议采用细网格剖分的线性减缩积分单元（例如，CAX4R、CPE4R、CPS4R 和 C3D8R 等）。
● 对接触问题采用线性减缩积分单元或细分的非协调单元（例如，CAX4I、CPE4I、

CPS4II 和 C3D8I 等）。

- 尽可能地减少网格形状的扭歪，形状扭歪的粗网格线性单元会导致非常差的结果。
- 对三维问题应尽可能采用六面体单元，它们以最短计算时间得出最好的结果。当几何形状复杂时，完全采用六面体单元构造网格往往难以办到；可以采用楔形和四面体单元。这些形状的一阶单元，如 C3D6 和 C3D4，是较差的单元；若要取得较好的精度，需剖分很细的网格。因此，只有在为了完成网格建模而万不得已的情况下才会应用这些单元，且这些单元应远离精度要求较高的区域。
- 一些前处理程序包含了自由网格算法，它们可用四面体单元构造任意形状的网格。只要采用二次四面体单元（C3D10），除了接触问题，其结果对小位移问题应该是合理的。C3D10 单元的修正单元 C3D10M 对大变形问题、接触问题有鲁棒性，并表现出最小剪切和体积锁闭性质。但无论采用何种四面体单元，计算所花费的时间都多于采用相应密度的六面体单元。建议不采用只包含线性四面体单元（C3D4）的网格，当单元数量较小时，其结果将是不准确的。

7.3.3 壳单元

壳单元用来模拟那些厚度方向尺寸远小于另外两维尺寸，且垂直于厚度方向的应力可以忽略的结构。

在 ABAQUS 中壳单元的名字以字母“S”开头。轴对称壳单元都以字母“SAX”开头，而反对称变形的轴对称单元以字母“SAXA”开头。除轴对称壳外，壳单元名字中的每一个数字表示单元中的结点数，而轴对称壳单元名字中的第一个数字则表示插值的阶数。

■ 壳单元库

一般的三维壳单元有三种不同的单元列式：一般壳单元、薄壳单元和厚壳单元。壳单元库中有线性和二次插值的三角形、四边形壳单元，以及线性和二次的轴对称壳单元。表 7-3 对单元库中提供的壳单元进行了总结。

表 7-3 ABAQUS 中的三类壳单元

一般壳单元	薄壳单元	厚壳单元
S4，S4R，S3/S3R，SAX1 SAX2，SAX2T	STRI3，STRI65 S4R5，S8R5，S9R5，SAXA	S8R，S8RT

■ 自由度

名字以数字“5”结尾的三维壳单元（例如 S4R5、STRI65）每一结点只有 5 个自由度：3 个平动自由度和面内的 2 个转动自由度（即没有绕壳面法线的转动自由度）。然而，如果需要的话，结点处的所有 6 个自由度都是可以激活的，例如，在施加转动边界条件时或者结点位于壳的折线上时就需要 6 个自由度。

其他的三维壳单位（例如 S4R，S8R）在每一结点处有 6 个自由度（3 个平动自由度和 3 个转动自由度）。

轴对称壳单元的每一结点有 3 个自由度：

- 1：r-方向的平动
- 2：z-方向的平动

● 6：*r-z* 平面内的平动

■ 单元性质

用壳单元可模拟的是具有某一方向尺度（厚度方向）远小于其他方向的尺度，且沿厚度方向的应力可忽略的特征的结构。例如，压力容器的壁厚小于整体结构尺寸的 1/10，一般可以用壳单元进行模拟分析，以下的尺寸可以作为典型整体结构尺寸：

● 支撑点之间的距离
● 加强构件之间的距离或截面厚度尺寸有很大变化处之间的距离
● 曲率半径
● 所关注的最高振动模态的波长

基于以上的特点，平面假定成立，即 ABAQUS 壳单元假定垂直于壳面的横截面在变形过程中保持为平面。注意，不要误解为上述厚度必须小于单元尺寸的 1/10。

精细网格可包含厚度尺寸大于壳平面内的尺寸的壳单元，但一般不推荐这样做，在这种情况下实体单元更合适。

所有的壳单元都有壳的截面特性，它规定了壳单元的材料性质和厚度。壳的横截面刚度可在分析中计算，也可在分析开始时计算。

若选择分析中计算刚度，ABAQUS 就会用数值积分方法来计算壳厚度方向上所选点的力学性质，所选的点称为截面点，如图 7-29 壳单元厚度方向截面点所示。相关的材料性质可以是线性或非线性的，用户可在壳厚度方向上指定任意奇数个截面点。

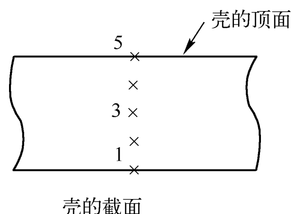


图 7-29　壳单元厚度方向截面点

若选择在分析开始时计算横截面刚度，可定义横截面性质来构造线性或非线性性质。此时 ABAQUS 直接根据截面工程参量（面积、惯性矩等）构造壳体横截面性质，所以不必设置积分单元横截面上的任何变量。因此，这个选择的计算量较小。此时会根据力和力矩结果来计算响应，只有特别输出要求时才会计算应力和应变。当壳体响应是线弹性时，建议采用这个方法。

■ 单元几何尺寸

壳单元的结点位置定义了单元的平面尺寸、壳面的法向、壳面的初始曲率，但没有定义壳的厚度。

● 壳体厚度和截面计算点

壳体厚度描述了壳体的横截面，必须对它定义。除了应定义壳体厚度，还应当在分析过程中或分析开始时，计算出横截面的刚度。若选择在分析过程中计算刚度，则 ABAQUS 采用数值积分法分别计算厚度方向每一个截面点（积分点）的应力和应变值，并允许非线性材料行为。

例如，一种弹塑性材料的壳在内部截面点还是弹性时，其外部截面点已经达到了屈服。S4R 单元（4 结点减缩积分）中积分点的位置和沿壳厚度方向截面的位置如图 7-30 所示。

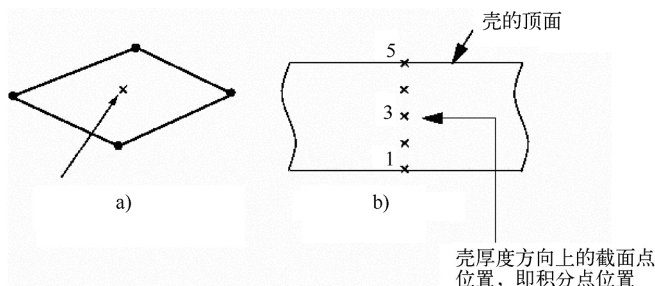


图 7-30 壳的数值积分点位置

a) S4R 单元的积分点位置 b) 壳的截面

在进行数值积分时，可指定壳厚度方向的截面点数目为任意奇数。默认情况下，ABAQUS 在厚度方向上取 5 个截面点，对各向同性壳来说，处理大多数非线性问题是足够的。但是，对于一些复杂的模型，必须取更多的截面点，尤其是处理交变的塑性弯曲问题（在这种情况下一般采用 9 个点）。对于线性材料，3 个截面点已经提供了沿厚度方向的精确积分。当然，对于线弹性材料壳来说，选择在分析开始时计算材料刚度更为有效。

在选择分析前就计算横截面刚度时，材料必须是线弹性的。此时所有的计算都根据横截面上的合力和合力矩来进行。如果需要，ABAQUS 将按默认设置计算壳底面、中面和顶面的应力和应变。

● 壳面和壳面法线

壳单元的相互连接需定义它们的正法线方向，如图 7-31 所示。

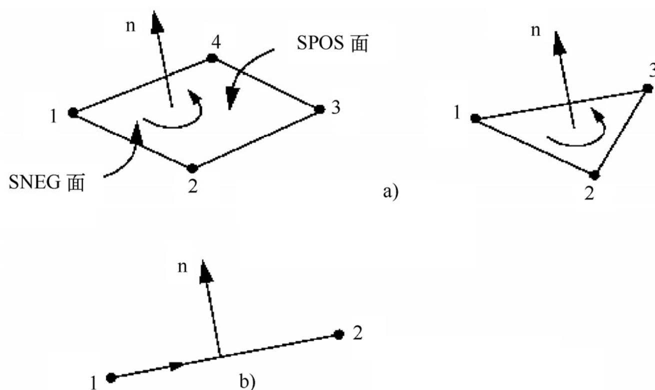


图 7-31 壳的正法线方向

a) 三维壳单元 b) 轴对称壳单元

对于轴对称壳单元来说，其正法线方向的定义是从 1 结点到 2 结点经逆时针旋转 90° 形成的方向。对于三维壳单元，其正法线方向是绕着单元的结点序号按右手法则移动给出的方向。

如图 7-31a 所示壳体顶面是指在正法线方向的面，称为 SPOS 面；而壳体底面是指在正

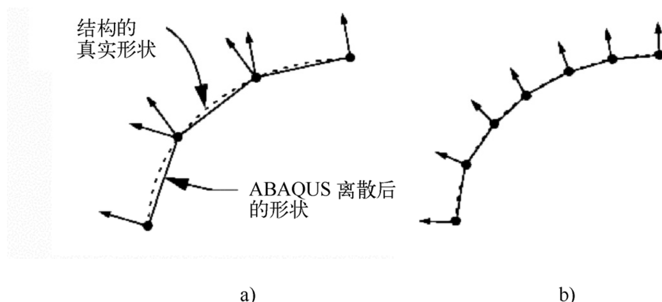
法线负方向的面，称为 SNEG 面，它们是为了处理接触问题而定义的。相邻壳单元的法线必须是一致的。

正法线方向约定了单元压力载荷方向和随壳厚度变化的输出量方向。壳体单元上压力的正方向即壳体的正法线方向（壳体单元上压力的正方向与实体上压力正方向刚好相反；而壳面压力约定与实体面上的压力是一致的。单元上分布载荷与面上分布载荷的差别可参考 ABAQUS/Standard 用户手册的相关章节）。

● 壳的初始曲率

ABAQUS 中大多数壳单元的列式为真正的曲壳单元，因此需要精确计算壳面的初始曲率。ABAQUS 自动计算每一个壳单元结点处的曲面法线来估算壳的初始曲率，并用精确的算法确定了每一结点处的表面法线，该算法可参考 ABAQUS/Standard 用户手册相关章节。

用户在实际使用时，可能会遇到这样的情况：采用图 7-32a 所示的粗网格，在连接邻近单元的同一个结点上，ABAQUS 得到多个独立的曲面法线。一个结点上有多个法线的物理意义是享有公共结点的单元边线是一条折线。当采用图 7-32b 所示的细网格时，结构模拟为平滑的曲壳结构。ABAQUS 在这种结点处创建一个平均的曲面法线而尽量使得壳面光滑。



a) b)

图 7-32 网格细划对壳面法线的影响

a) 粗网格 b) 细网格

ABAQUS 所用的基本光滑算法如下：若与一结点相关的诸单元法线夹角在 20° 以内，这些法线将被平均，平均值赋予此结点，即与该结点相关的单元法线都为平均值。如果上述条件不能满足，则 ABAQUS 不能光滑壳面，在数据文件（*.dat）中将发出一个警告的信息。

为了在曲壳中引入折线或用粗网格模拟曲壳，有两种方法可以改变默认算法，用紧接结点坐标后面的第 4、第 5、第 6 个数据值给出法线矢量的分量（这种方法需要在文本编辑器中编辑由 ABAQUS/CAE 产生的输入文件），或用*NORMAL 选项直接定义法线方向（使用 ABAQUS/CAE Keywords Editor 能加入这个选项）。如果两种方法均被使用，则后者优先。更详细的资料请参阅 ABAQUS/Standard 用户手册相关章节。

● 参考面的偏移

壳的参考面是通过壳单元的结点和法线来定义的，用壳单元建模时，典型的参考面是壳体的中面。然而，在很多情况下参考面定义为中面的偏移面更为方便。

例如，在 CAD 软件包里创建的曲面一般代表的是壳体的顶面或底面，因此要偏移壳体中面，定义参考面和 CAD 面一致是十分方便的。

壳体参考面的偏移也可以被用于定义接触问题中更精确的几何面，此时的壳体厚度很重

要。在模拟一个厚度连续变化的壳体时，壳体参考面偏移是十分有用的，但在这种情况下定义壳体中面的结点位置较为困难。

在实际应用中，如果一个表面光滑而其他表面粗糙（比如在某些飞机结构中），使用壳体参考面偏移在光滑表面上定义结点是最容易的。偏移值能用中面到参考表面的厚度与壳体厚度的比值来引入，如图 7-33 所示。

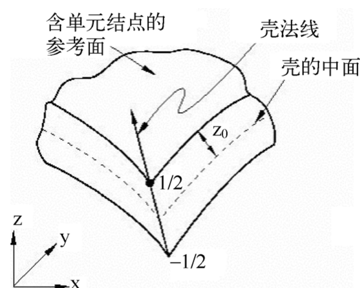


图 7-33 偏移值为 0.5 的壳体偏移示意图

■ 壳体计算假定－厚壳或薄壳

■ 单元列式和积分

ABAQUS 中一般壳单元、厚壳单元和薄壳单元可以通过单元列式区分开。

S4S4R，S31S3R 和 SAX 轴对称壳单元考虑了有限膜应变，而且允许壳的厚度随着单元的变形而变化。其余的壳单元均假定小应变和壳的厚度不发生变化，即使单元的结点可能发生有限转动。

所有的四边形壳单元（S4 除外）和三角形壳单元（S3/S3R 除外），都应用减缩积分方案。其他的三角形壳单元应用完全积分方案。

■ 单元输出变量

壳单元的输出变量根据每一个壳单元表面上的局部材料方向进行定义。在大位移分析中，这些轴随着单元的变形而发生转动。用户也可以定义单元局部坐标系，它们在大位移分析中随单元变形可以旋转。

壳体问题可以归结为薄壳问题和厚壳问题二者之一。厚壳问题假定横向剪切变形对计算结果有重要的影响。而薄壳问题是假定横向剪切变形对计算结果的影响已经小到了可以忽略的地步。图 7-34 描述了横向剪切变形的影响。

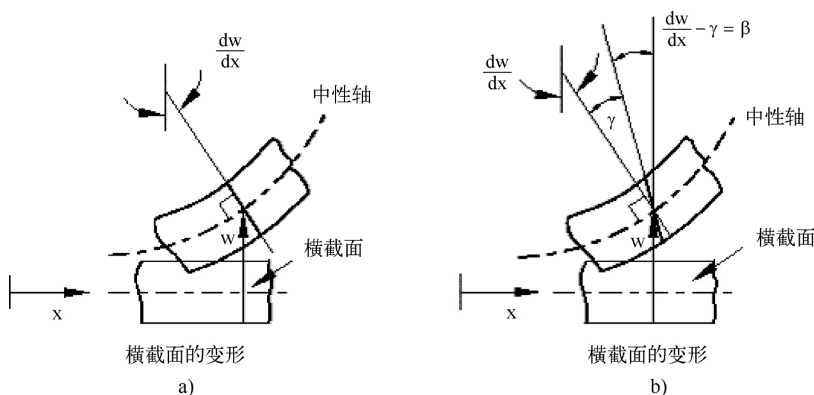


图 7-34 薄壳和厚壳的横截面特性

a) 薄壳 b) 厚壳

在 ABAQUS 中，按厚、薄壳问题的应用来划分，可分为普通壳单元、薄壳单元、厚壳单元三类不同的壳单元。普通壳单元对于薄壳和厚壳问题的应用均有效，而且所有普通壳单元都考虑了有限薄膜应变。在某些情况下，通过应用带特殊用途的壳单元可以获得增强的性

能。所有带特殊用途的壳单元都假定有限转动和小应变。带特殊用途的壳单元分为两类：薄壳单元和厚壳单元。薄壳单元强加了 Kirchhoff 条件，即：垂直于壳中面的平面在变形中保持垂直于壳中面。Kirchhoff 条件也可以从单元列式中以解析方式强加（STRI3），或者用罚方法以数值方式强加。厚壳单元是二阶四边形单元，在小应变情况下，当载荷使计算结果沿壳的跨度方向上平缓变化时，这种单元能产生比普通壳单元更精确的结果。表 7-4 列举了这三类壳单元。

表 7-4 ABAQUS 中的三类壳单元

一般应用壳	薄　壳	厚　壳
S4R，S3R，SAX1，SAX2，SAX2T	STRI3，STRI35，STRI65，S4R5，S8R5，S9R5，SAXA	S8R，S8RT

若要判断一个给定的问题应该用薄壳单元还是厚壳单元，可以先判断壳的横向剪切对问题的影响程度。壳的横向剪切柔度对厚壳比较重要，而对薄壳的影响可以忽略不计。壳体的横向剪切的重要程度可以用厚跨比进行估算，当单一材料制造的各向同性壳体的厚跨比大于 1/15 时，认为是厚壳问题；厚跨比小于 1/15 时，则认为是薄壳问题。这个估算是近似的，用户应当核对模型中的横向剪切影响，以此来验证假定的壳体性能。由于横向剪切柔度在复合材料层合壳结构中作用显著，故它的比值（厚跨比）应远小于薄壳理论中采用的比值。具有高柔韧中间层的复合材料（所谓“三明治”复合材料）横向剪切刚度很低，常用厚壳来模拟。如果壳体的平面假定被违背，应使用实体单元。

有关检验应用壳体理论的有效性的详细资料请参阅 ABAQUS/Standard 用户手册的相关帮助章。

横向剪切力和剪切应变对于普通壳单元和厚壳单元是必须考虑的。对三维单元，提供了可估计的横向剪切应力。在计算这些应力时，忽略了弯曲和扭转变形的耦合作用，并假定材料性质和弯矩的空间梯度很小。

■ 壳的材料方向坐标

和实体单元不一样，每个壳体单元都可以使用局部材料方向。各向异型材料（如纤维增强复合材料）的数据和单元输出变量（如应力和应变）都是以局部材料方向定义的。在大位移分析中，壳单元上的局部材料轴随着材料各积分点上的平均运动而转动。

● 默认的局部材料方向

局部材料 1 方向和 2 方向位于壳单元面内，默认的 1 方向是整体坐标系 1 轴在壳面上的投影。如果整体坐标 1 轴是壳面的法线，局部材料 1 方向就是整体坐标 3 轴在壳表面的投影。局部 2 方向垂直于壳面内部的局部 1 方向，以便局部 1 方向、2 方向和壳体表面的正法线形成右手坐标系，如图 7-35 默认的壳体局部材料方向所示。

默认的壳体局部材料方向系统有时会导致一些问题，以图 7-36 所示圆柱体为例。对于图中大多数单元，其局部 1 方向是环向的。然而，却有一行单元垂直于整体 1 轴。对于这些单元来说，局部 1 方向为整体 3 轴在壳表面上的投影，使局部 1 方向以轴向来代替环向。局部 1 方向的应力σ_{11}的等位线图中大多数σ_{11}为环向应力，而部分单元上的σ_{11}为轴向应力。在这种情况下就需要定义更适合的模型的局部方向。

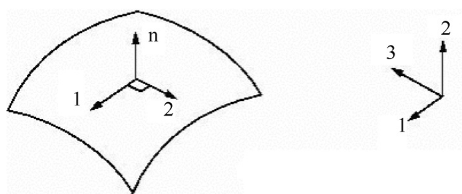


图 7-35　默认的壳体局部材料方向

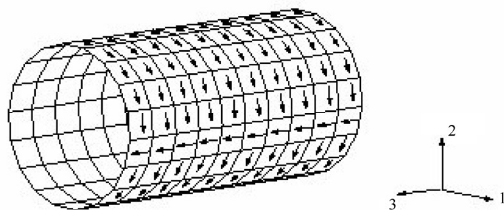


图 7-36　在圆柱中默认的局部材料 1 方向

● 建立可变的材料方向

如图 7-37 局部坐标系的定义所示，我们能用局部的直角坐标系、柱坐标系和球坐标系来代替整体的笛卡儿坐标系。

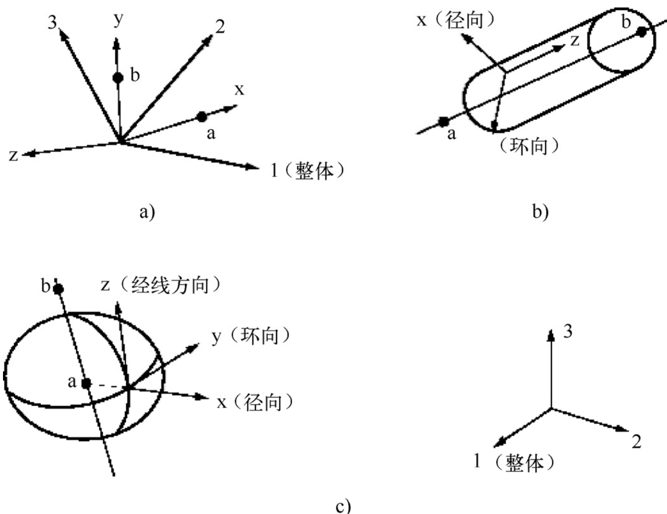


图 7-37　局部坐标系的定义

a) 直角坐标系　b) 柱坐标系　c) 球坐标系

定义局部坐标系(x', y', z')的方向使局部坐标的坐标轴方向与材料方向一致，因此必须使局部坐标轴（1 轴、2 轴或 3 轴）最接近垂直于壳体材料 1 方向和 2 方向并指定绕轴旋转的角度值。

ABAQUS 遵循坐标轴（1 轴、2 轴或 3 轴）循环置换准则，并把选择的下一个坐标轴投影到壳体上形成材料的 1 方向。例如，若选择 *x*'轴，ABAQUS 把 *y*'轴投影到壳体上形成材料的 1 方向，材料的 2 方向将由壳表面法线和材料 1 方向的叉积来定义，正常情况下，最终的材料 2 方向和其他局部轴的投影（如本例中的 *z*'轴）对曲壳而言是不一致的。

如果这些局部坐标轴不能建立满意的材料方向，可以定义一个绕选定的坐标轴旋转的转角值，另外两个局部轴在投影到壳表面上之前将该转角转动，从而给出最终的材料方向。由于投影很容易被转换，故选定的轴应尽可能接近壳体法线。

例如，当图 7-36 中圆柱的中心线与整体坐标 3 轴一致时，局部材料方向可这样定义：使局部材料 1 方向总是沿圆环方向，相应的局部材料 2 方向总是沿轴向。

● 定义局部材料方向

从属性（Property）模块的主菜单中，选择“工具（Tools）→基准（Datum）”，并定义一个基准圆柱坐标系。

选择“指派（Assign）→材料方向（Material Orientation）”给部件赋于局部材料坐标方向。当提示选择坐标系时，选择刚定义的基准坐标系，“近似的壳体法线方向”是“Axis–1”，不需要额外的旋转。

■ 壳单元的选择

- 当要求解十分精确时，可使用线性、有限薄膜应变、完全积分的四边形壳单元（S4），这个壳单元十分适合于要考虑膜作用或有弯曲模式沙漏的问题，也适用于有平面弯曲的问题。
- 线性、有限薄膜应变、减缩积分、四边形壳单元（S4R）的使用比较普便，适合于各类问题的应用。
- 线性、有限薄膜应变、三角形壳单元（S3/S3R）可作为一般的壳单元来应用。因为在单元内部是常应变近似场，求解弯曲变形和高应变梯度问题时需进行精细的网格剖分。
- 考虑到在复合材料层合壳模型中剪切柔度的影响，可采用厚壳单元（S4，S4R，S3/S3R，S8R）来进行模拟，此时需检验是否满足平面假定。
- 四边形或三角形的二次壳单元，对一般的小变形薄壳问题来说是很有效的，但它们对剪力锁闭和薄膜锁闭不敏感。
- 如果在接触分析中必须使用二阶单元，那么不要选用二阶三角形壳单元（STRI65），而要采用 9 结点的四边形壳单元（S9R5）。
- 对于几何线性，且规模非常大的模型，线性薄壳单元（4R5）通常将比一般壳单元效率更高。

7.3.4 梁单元

对于某一方向尺寸（长度方向）明显大于其他两个方向的尺寸，并且以纵向应力为主的结构，ABAQUS 用梁单元对它模拟。梁的理论基于这样的假设：结构的变形可以全部由沿梁长度方向的位置函数来决定。当梁的横截面的尺寸小于结构典型轴向尺寸的 1/10 时，梁理论能够产生较精确的结果。常见的典型轴向尺寸如下：

- 支承点之间的距离；
- 有重大变化的横截面之间的距离；
- 所关注的最高振型的波长。

ABAQUS 梁单元假定梁横截面与梁的轴向垂直，并在变形时保持平面。

要注意并不是所有梁单元的横截面的尺寸必须小于典型单元长度的 1/10，因为高度精细的网格可能包含长度小于横截面尺寸的梁单元，不过并不推荐这种方式，这种情况下更适合使用实体单元。

在 ABAQUS 中梁单元的名字以字母“B”开头。下一个字符表示单元的维数：“2”表示二维梁单元，“3”表示三维梁单元。第三个字符表示插值的阶数：“1”表示线性插值，“2”表示二次插值，“3”表示三次插值。

■ 梁单元库

梁单元库中有二维和三维的线性、二次及三次梁单元。

■ 自由度

三维梁单元每个结点有 6 个自由度：3 个平动自由度（1～3）和 3 个转动自由度（4～6）。“开口截面”型的梁（例如 B31OS）有一个表示梁横截面翘曲量的附加自由度（7）。

二维梁单元的每个结点有 3 个自由度：2 个平动自由度（1 和 2）和 1 个绕模型所在平面法线的转动自由度（6）。

■ 单元性质

所有的梁单元必须有梁截面特性，它规定了梁的材料性质和梁横截面轮廓线。结点坐标只定义了梁的长度，用户必须给出梁截面轮廓线的几何尺寸和形状。换言之，用户可以通过给定截面面积和惯性矩这类工程特性参数来定义一个一般的梁截面轮廓线。

若用户定义了梁截面的几何轮廓线，ABAQUS 就会用数值积分方法计算横截面性质，材料可以是线性或非线性的。

若用户用截面的面积，惯性矩和扭矩等工程特性参数来代替指定横截面尺寸，则 ABAQUS 就不必对横截面积分，这种情况计算量较小。在用这个方法时，材料可以是线性或非线性的。此时，根据力和弯矩结果来计算响应，只有在特别请求时才计算应力和应变。

● 梁横截面的几何形状

如果用梁横截面的形状和尺寸来定义梁的外形，ABAQUS 提供了如图 7-38 所示的各种常用的梁横截面形状以便选用。其中的任意多边形横截面可以定义任意形状的薄壁截面梁。详情可参考 ABAQUS 用户手册的相关章节。

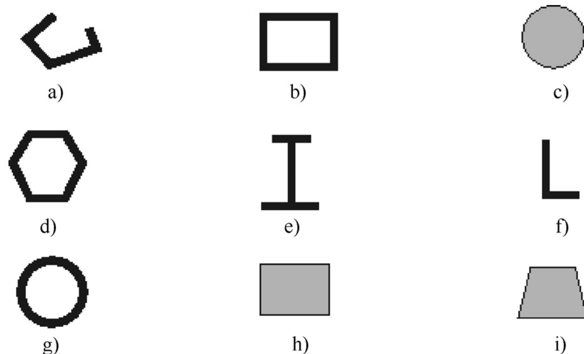


图 7-38 梁横截面形状

a) 任意多边形梁 b) 箱式梁 c) 圆梁 d) 六边形梁 e) 工字梁 f) L 形梁 g) 管形梁 h) 矩形梁 i) 梯形梁

在定义梁横截面的几何形状时，ABAQUS/CAE 会提示输入所需尺寸，不同的横截面类型会有不同的尺寸要求。

如果梁的外形与梁横截面的截面性质有关时，可以要求在分析过程中计算横截面的工程特性参数，也可以要求在分析开始前预先计算横截面的工程特性参数。当材料的力学特性既有线性又有非线性时（例如，截面刚度因塑性屈服而改变），可以选用第一种方式；而对线弹性材料，第二种方式效率更高。

此外，也可以不给出横截面尺寸，而直接给出横截面的工程特性参数（面积、惯性矩和

扭转常数），这时材料的力学特性既可以是线性的也可以是非线性的。这样就可以组合梁的几何和材料特性来定义梁对载荷的响应，同样，响应也可以是线性或非线性的。详情可参考 ABAQUS 用户手册中相关章节。

● 截面计算点

梁横截面的几何形状和尺寸确定后，就要在分析过程中计算横截面的工程特性参数，ABAQUS 用一组分布于梁横截面上的计算点来计算梁单元的响应。横截面计算点的编号以及位置详见 ABAQUS 用户手册相关章节。单元的变量如应力和应变等，可在任意一个横截面计算点上输出。然而，默认的输出点只在几个指定的横截面计算点上给出，详见 ABAQUS 用户手册相关章节。

图 7-39 所示，为一矩形梁单元内的积分点和默认横截面点示意图。对该横截面，只有计算点 1、5、21 和 25 的值是默认输出，图 7-39 所示的梁单元总共使用 50 个横截面计算点（每两个结点之间 25 个）来计算单元刚度。若选择预先计算横截面特性参数，ABAQUS 不在截面计算点上计算梁的响应，而是根据梁截面的工程特性参数确定截面的响应。因而，此时 ABAQUS 只把截面计算点作为输出结果的位置，所以要指定需输出结果的截面计算点。

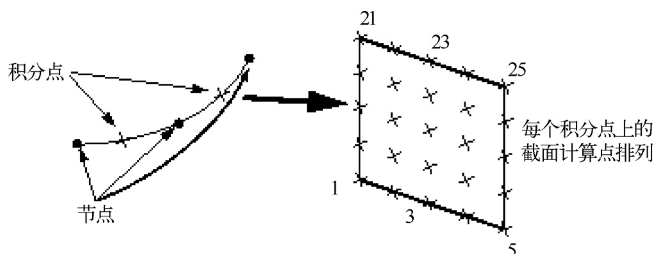


图 7-39　B32 矩形梁单元内的积分点和默认横截面点

● 横截面定向

用户必须在全局直角坐标空间（GCS）中定义梁横截面的方向。从单元的第一结点到下一个结点的矢量被定义为沿着梁单元的局部切线 t，梁横截面与局部切线矢量 t 垂直。由 n_1 和 n_2 代表局部梁横截面轴（1-2）。这三个矢量 t、n_1、n_2 构成了右手法则的局部直角坐标系，如图 7-40 所示。

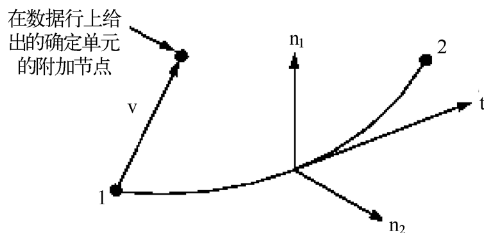


图 7-40　梁单元切向矢量 t，梁横截面轴 n_1 和 n_2 的取向

对于二维梁单元，n_1 的方向总是（0.0，0.0，-1.0）。

对于三维梁单元可用几种方法来定义局部梁横截面轴的方向。

第一种方法是在数据行中指定一个附加的结点来确定单元方位（这种方法要用手动编辑 ABAQUS/CAE 产生的输入文件）。从梁单元的第一结点到附加结点的矢量 V（见图 7-40），

初步作为 n_1 的近似方向。然后，ABAQUS 把 t×V 作为梁的 n_2 方向，在 n_2 确定后，ABAQUS 再定义真正的 n_1 方向为 n_2×t，上述过程确保了局部切线矢量和局部梁横截面轴构成正交系。

第二种方法是在 ABAQUS/CAE 中定义梁截面特性时，给定一个近似的 n_1 方向，然后 ABAQUS 会按上述过程计算实际的梁截面轴。如果在指定一个附加结点的同时又给出一个近似的 n_1 方向，ABAQUS 将优先采用前者。

如果没有提供近似的 n_1 方向，ABAQUS 将把从原点到点（0.0，0.0，-1.0）的矢量作为默认的 n_2 方向，这可算作第三种方法。

有两种办法可以用来覆盖被 ABAQUS 定义的 n_2 方向，两种办法都要求手动编辑输入文件。一种是把 n_2 矢量的分量作为第 4、5、6 个数据值紧跟在结点坐标数据后面给出；另一种是使用*NORMAL 选项直接指定法线方向（该选项可以使用 ABAQUS/CAE 中的 Keywords Editor 添加上）。如果两种办法都使用，则后者优先。ABAQUS 再定义方向 n_1 为 n_2×t。

用户给出的 n_2 方向不必与梁单元切线 t 垂直，当 n_2 方向确定后，局部梁单元切线可以重新定义为 n_1×n_2 的值。这样再定义的局部梁切线 t，很可能与从第一结点到第二结点的矢量所定义的梁轴线不一致。如果 n_2 方向对垂直于单元轴线平面的转角超过了 20°，ABAQUS 将在数据文件中给出一个警告信息。

● 梁单元曲率

梁单元的曲率是基于梁的 n_2 方向相对于梁轴的方向来确定的。如果 n_2 方向不与梁轴的正交（即梁轴向和切向量 t 不一致），则认为梁单元有初始弯曲。由于曲梁和直梁的性能不同，用户必须检查模型以确保应用正确的法线和曲率。对于梁和壳体，ABAQUS 使用同样的算法来确定几个单元公共结点的法线。请参阅 ABAQUS 用户手册相关章节。

如果用户打算模拟曲梁结构，可能应当使用前面所介绍的直接定义 n_2 方向的两种方法之一，它允许用户有很大的控制权来模拟曲率。即使用户打算模拟直梁，也可以引入曲率作为公共结点的平均法线。

● 梁横截面的结点偏移

当梁单元作为壳模型的加强部件时，如果梁单元和壳单元有共同结点分析过程就很方便。壳单元结点位于壳的中面上，梁单元结点位于梁横截面的某处。因此，如果要壳和梁单元有共同结点，壳和加强梁就会重叠，除非梁横截面从结点位置处偏移，如图 7-41 所示。

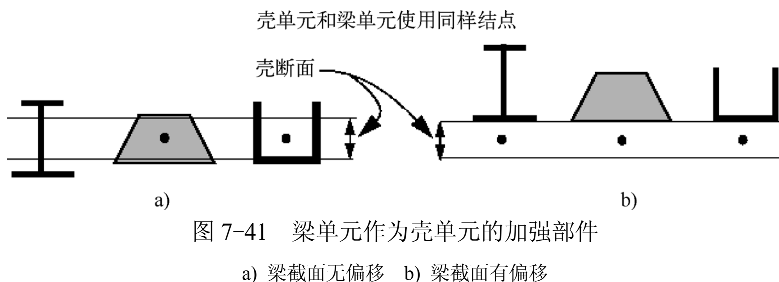


图 7-41　梁单元作为壳单元的加强部件

a) 梁截面无偏移　b) 梁截面有偏移

对于工字型、梯型和任意多边形的梁横截面，可以定义该截面形状位于离截面局部坐标系原点某一距离，且使它等于偏离单元结点的距离。由于很容易使这几种形状梁的横截面偏离梁的结点，它们可以作为图 7-41b 所示的加强部件（如果加强部件的凸缘或网翼翘曲很重

要，则应该用壳单元来模拟）。

图 7-42 所示的工字型梁附着在一个 1.2 个单位厚的壳上。可以给位于梁截面底部的结点定义一个偏移量来确定梁截面的位置，此处的偏移量为 0.6，即壳厚度的一半。

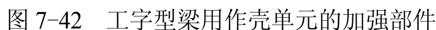


图 7-42　工字型梁用作壳单元的加强部件

同样也可以指定形心和剪切中心的位置，它们的位置可以由梁的结点偏移值来确定，这样也可以形成刚度。

另外也可以分别定义梁单元和壳单元，然后用两个结点间的刚梁约束来连接它们。详细情况可参阅 ABAQUS 用户手册的相关章节。

■ 单元列式和积分

ABAQUS 中的所有梁单元都是梁柱类单元——这意味着单元可以有轴向、弯曲和扭转变形。此外，Timoshenko 梁单元还要考虑横向剪切变形的影响。

● 剪切变形

线性单元（B21 和 B31）及二次单元（B22 和 B32）是考虑剪切变形的 Timoshenko 梁，因此，它们适合于模拟剪切变形起重要作用的深梁和剪切变形不太重要的细长梁。这些单元横截面的特性与厚壳单元相类似，如图 7-43b 所示。

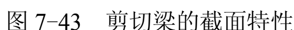


图 7-43　剪切梁的截面特性

a) Euler-Bernoulli 梁　b) Timoshenko 梁

ABAQUS 假设这些梁单元的横向剪切刚度为线弹性常量。另外，构造这些梁的列式使它们的横截面积可以作为轴向变形的函数而改变，在几何非线性场合还要考虑非零泊松比的影响。

只要梁的横截面尺寸小于结构典型轴向尺寸的 1/10，使用这些单元就可以得出有用的结果。通常认为这是梁理论适用性的界限。此外，如果梁横截面在弯曲变形时不能保持平面，梁单元就不适合模拟这种变形。

三次单元被称为 Euler-Bernoulli 梁单元（B23 和 B33），它们不能模拟剪切柔度。这些单元的横截面保持与梁轴线垂直，如图 7-43a 所示。

因此，用三次单元模拟相对细长的构件更为有效。由于三次单元的位移变量沿单元长度方向为三次方，故在静态分析中，常用三次单元模拟结构构件，但在动态分析中要尽量少用这种单元。三次单元总是假设单元的剪切变形可以忽略。

一般情况下，只要横截面的尺寸小于典型轴向尺寸的 1/15，这个假设就是有效的。

● 扭转响应-翘曲

结构构件经常承受扭矩，几乎所有的三维框架结构都会发生这种情况。在一个构件中引起弯曲的载荷在另一个构件中可能引起扭转，如图 7-44 所示。

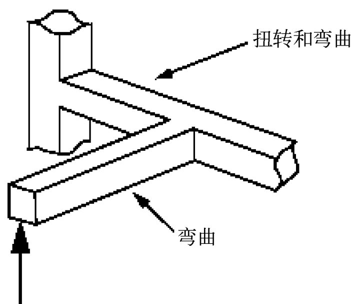


图 7-44 框架结构中的扭转

梁对扭转的响应依赖于它的横截面形状。一般说来，梁的扭转会使横截面产生翘曲或非均匀的离面位移。ABAQUS 只考虑三维梁单元的扭转和翘曲的影响。翘曲计算假设翘曲位移是小量。

以下各种梁截面在受扭时的力学行为是不同的。

✧ 实心横截面

在扭转作用下，非圆形的实心横截面不再保持平面而是发生翘曲。ABAQUS 应用 St.Venant 翘曲理论计算由翘曲引起的每一横截面点处的剪切应变分量。

这种横截面的翘曲被认为是自由的，翘曲产生的轴向应力可以忽略不计（翘曲约束仅仅影响非常靠近约束端处的结果）。

实心横截面梁的扭转刚度取决于材料的剪切模量 G 和梁横截面的扭转常数 J。J 取决于梁的横截面形状和翘曲特征。对于在横截面上产生较大非弹性变形的扭转载荷，用这种方法模拟是不够精确的。

✧ 闭口薄壁横截面

闭口薄壁非圆形横截面的梁（箱式或六边形）具有明显的抗扭刚度，因此，其性质与实心横截面类似。ABAQUS 假设横截面翘曲也是自由的。

基于横截面的薄壁性质，ABAQUS 假设剪应变沿壁厚是个常数。当壁厚是典型横截面尺寸的 1/10 时，薄壁假设是有效的。常见的薄壁横截面的典型横截面尺寸包括：

（1）圆管横截面的直径；

（2）箱式横截面的边长；

（3）任意形状横截面的典型边长。

✧ 开口薄壁横截面

开口薄壁横截面在扭矩作用下发生无约束翘曲时的刚度非常小，而这种结构的抗扭刚度的主要来源是对轴向翘曲应变的约束。对开口薄壁梁翘曲的约束导致了轴向应力，而该应力却会影响梁对其他载荷类型的响应。

ABAQUS 有剪切变形梁单元 B31OS 和 B32OS，它们包含了对开口薄壁横截面的翘曲影响。当承受明显的扭转载荷时，必须使用这些单元来模拟具有开口薄壁横截面的结构，例如管道（定义为任意多边形横截面）或者工字型横截面。

● 翘曲函数

翘曲导致的沿梁横截面变化的轴向变形可用翘曲函数来描述。在开口横截面单元中，用一个附加的自由度 7 来描述这个函数的量值。

约束这个自由度可以使其在施加约束的结点处不发生翘曲。因为在每个构件上的翘曲幅度不同，所以在开口横截面梁框架结构的连接点处，一般每个构件使用各自的结点，如图 7-45 所示。

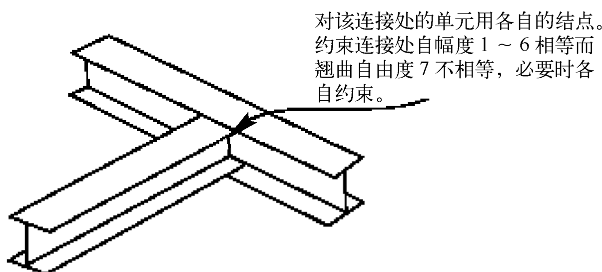


图 7-45　开口薄壁梁的连接

然而如果连接方式设计为防止翘曲的，那么所有构件应使用一个公共的结点，而且必须约束翘曲自由度。

当剪力不通过梁的剪切中心时会产生扭转，扭转力矩等于剪力乘以它到剪切中心的偏心距。对于开口薄壁梁，形心和剪切中心常常不重合，如图 7-46 所示。

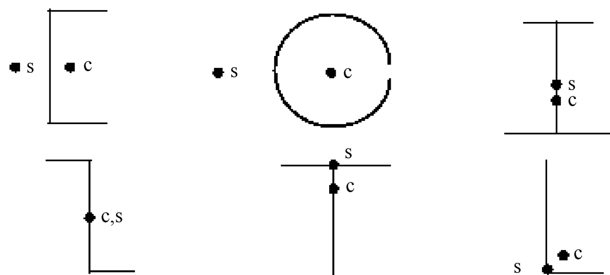


图 7-46　一些梁横截面的剪切中心 s 和形心 c 的近似位置

如果结点不是位于横截面的剪切中心，那么在载荷作用下横截面可能会发生扭曲。

ABAQUS 中，线性梁单元（B21 和 B31）和二次梁单元（B22 和 B32）允许剪切变形，并考虑了有限轴向应变；它们不仅适合于模拟细长梁，也适合于模拟短梁。

尽管三次梁单元（B23 和 B33）允许梁有大位移和大转动，但不考虑剪切柔度，并且假定轴向应变很小，因此，它们适合于模拟细长梁。

ABAQUS 提供线性和二次梁单元的变种单元（B31OS 和 B32OS）来模拟薄壁开口梁。这些单元能正确地模拟开口横截面的扭转和翘曲效应，例如 I-型和 U-型槽钢。

ABAQUS 也提供杂交梁单元来模拟非常细长的构件，例如海上石油平台上的柔性立管

和模拟非常刚硬的连接件。

■ 单元输出变量

三维剪切变形梁单元可输出应力分量：轴向应力（σ_{11}）和扭转引起的剪应力（σ_{12}）。在薄壁截面梁中剪应力沿截面的壁作用，相应的应变量也可以输出。剪切变形梁单元也可输出截面上的横向剪力。

细长（三次）梁的输出结果只有轴向变量。空间开口截面梁的输出结果也只有轴向变量，因为此时的扭转剪应力可略去。

所有的二维梁单元只输出轴向的应力和应变。

根据用户需要，轴向力、弯矩和绕局部梁轴的曲率也可以输出。至于哪种单元提供哪些分量的详细情况，可以查阅 ABAQUS 用户手册的相关章节。

■ 梁单元的选择

- 对任何涉及接触的分析，应使用一阶的、有剪切变形的梁单元（B21，B31）。
- 对于结构刚度非常大或者非常柔软的结构，在几何非线性分析中应当使用杂交梁单元（B21H，B32H 等）。
- Euler-Bernoulli 三次梁单元（B23，B33）在模拟承受分布载荷作用的梁，包括动态的振动分析时，会有很高的精度。如果横向剪切变形也很重要，则使用 Timoshenko 二次梁单元（B22，B32）。
- 模拟有开口薄壁横截面的结构应当使用开口横截面翘曲理论的梁单元（B31OS，B32OS）。

7.3.5 桁架单元

桁架单元是只能承受拉载荷的杆。它们不能承受弯矩，因此适合于模拟铰接框架结构。桁架单元还可以近似地模拟线缆和弹簧（例如，网球拍）。桁架单元有时还用来代表其他单元里的加强构件。

所有桁架单元的名字都以字母“T”开头。随后的两个字符表示单元的维数，如“2D”表示二维桁架单元，“3D”表示三维桁架单元。最后一个字符表示单元中的结点数。

- 桁架单元库

桁架单元库中有二维和三维的线性和二次桁架单元。

- 自由度

桁架单元的结点只有平动自由度。三维桁架单元有 1、2 和 3 三个自由度，二维桁架单元只有 1 和 2 两个自由度。

- 单元性质

所有的桁架单元必须有桁架截面性质，它包括材料特性和横截面积。

- 单元列式和积分

除了有标准的单元列式外，还有一种杂交桁架单元列式。这种单元适合于模拟刚度比整体结构的刚度大得多的非常刚硬的连接件。

- 单元输出变量

桁架单元的输出变量为轴向的应力和应变。

7.4 网格划分

完成布种、网格控制的设置即可以开始进行网格的划分。划分网格前，首先要选择单元类型。

7.4.1 选择单元类型

单击按钮，在视图区中拾取部件，单击中键，弹出图 7-47 示的“单元类型”对话框。



图 7-47 “单元类型”对话框

■ 单元库（Element Library）

该栏用于选择适用于隐式或显式分析的单元库。

- Standard：此为默认选项，用于选择适用于 ABAQUS/Standard 分析的单元库。
- Explicit：用于选择适用于 ABAQUS/Explicit 分析的单元库，是 ABAQUS/Standard 单元库的子集。

■ 几何阶次（Geometric Order）

该栏用于选择线性单元或二次单元。

- 线性（Linear）：此为默认选项，用于选择线性（一次）单元。线性单元结点仅包含在单元的顶角处，采用线性插值，如线性线（Line）单元包含 2 个结点、线性三角形（Tri）单元包含 3 个结点、线性六面体（Hex）单元包含 8 个结点。
- 二次（Quadratic）：用于选择二次单元，在单元每条边上布置中间结点，采用二次插值，如二次线（Line）单元包含 3 个结点、二次三角形（Tri）单元包含 6 个结点、二次六面体（Hex）单元包含 20 个结点。

■ 族（Family）

该列表用于选择适用于当前分析类型的单元。表内列出的单元族与该模型区域的维数（三维、二维、轴对称）、类型（可变形的、离散刚体、解析刚体）、形状（体、壳、线）相

对应，单元名称的首字母或前几个字母往往代表该单元的种类。下面简单介绍各种模型区域的单元族。更为详尽的说明请参考 7.3 单元族一节，也可以参阅 ABAQUS 的相关帮助章节。

- ✧ 三维变形体（Modeling Space 为 3D，Type 为 Deformable，Shape 为 Solid）和三维离散刚体包括 3D Stress（三维应力单元，以字母 C 开头）等 10 种单元。
- ✧ 三维变形壳包括 Shell（壳单元，以字母 S 开头）、Membrane（膜单元，以 M 开头）、Surface（表面单元，以 SFM 开头）等 7 种单元。
- ✧ 二维变形壳包括 Plane Stress（平面应力单元，以 CPS 开头）、Plane Strain（平面应变单元，以 CPE 开头）等 12 种单元。
- ✧ 三维变形线包括 Beam（梁单元，以 B 开头）、Truss（桁架单元，以 T 开头）等 10 种单元，二维变形线和二维解析刚体线包括 Beam（梁单元，以 B 开头）、Truss（桁架单元，以 T 开头）等 9 种单元。
- ✧ 轴对称变形壳包括 Axisymmetric Stress（轴对称应力单元，以 CAX 开头）等 9 种单元，轴对称变形线和轴对称解析刚体线包括 Axisymmetric Stress（轴对称应力单元，以 SAX 开头）等 6 种单元。
- ✧ 三维离散刚体壳、三维离散刚体线、二维离散刚体线和轴对称离散刚体线包括 Discrete Rigid Element（刚体单元，以 R、RB 或 RAX 开头）。

另外，单元族（Family）也会随着单元库（Element Library）的选择而发生变化。

- ■ 单元形状（Element Shape）：该项目用于选择单元形状并设置单元控制参数（Element Controls）。

该对话框默认显示与“网格控制属性”（Mesh Controls）对话框中设置的“单元形状”（Element Shape）一致的页面（线模型为 Line，壳模型为 Quad 或 Tri，体模型为 Hex、Wedge 或 Tet）。例如在“网格控制属性”对话框的“单元形状”栏内选择了“楔形单元”（Wedge），则打开“单元类型”（Element Type）对话框，默认显示“楔形”页面。

- ● 单元控制（Element Controls）

该栏用于设置“单元控制属性”选项。每个“单元形状”（Element Shape）页面内都列出了各自的单元控制选项，这些选项随着“单元库”（Element Library）、“几何阶次”（Geometric Order）、“族”（Family）的选择而发生变化，用户可以根据需要进行设置。

下面介绍单元控制（Element Controls）栏内用于选择单元类型（减缩积分单元、非协调模式单元、修正单元和杂交公式）的选项，这些单元类型可以通过该栏上端的复选框进行选择。

- ✧ 减缩积分单元（Reduced integration）：减缩积分单元（单元名称以字母 R 结尾）仅适用于划分壳的四边形单元和划分实体的六面体单元，它比完全积分单元在每个方向上少用一个积分点，线性减缩积分单元仅在单元中心包含一个积分点，而二次减缩积分单元的积分点数量与线性完全积分单元相同。对于四边形单元和六面体单元，ABAQUS/CAE 默认选择 Reduced。
- ✧ 积分单元（Integration）：用户可以取消该选择而采用完全积分单元。
- ✧ 非协调模式单元（Incompatible modes）：非协调模式单元（单元名称以字母 I 结尾），仅适用于线性四边形单元和线性六面体单元，它把增强单元位移梯度的附加自

由度引入线性单元，能克服剪切自锁问题，具有较高的计算精度。建议读者在单元扭曲较小时选用非协调模式单元，可以用线性单元的计算时间得到与二次单元相当的计算精度。非协调模式单元与减缩积分单元不能同时被选中，用户可以选择 Incompatible modes 项来选用非协调模式单元。

✧ 修正单元（Modified formulation）：修正单元（单元名称以字母 M 结尾）仅适用于二次三角形和四面体单元，它在单元的每条边上采用修正的二次插值。对于三角形和四面体单元，ABAQUS/CAE 默认选择 Modified formulation，用户可以取消对修正二次单元的选择。

✧ 杂交公式（Hybrid formulation）：对于 ABAQUS 的大多数单元类型，用户都可以选择 Hybrid formulation 项来选用杂交公式（单元名称以字母 H 结尾）。若模型的材料是不可压缩的（泊松比为 0.5）或接近不可压缩的，应该选用杂交公式。杂交公式与减缩积分单元、非协调模式单元或修正单元可以同时被选中（单元名称分别以 RH、IH、MH 结尾）。

设置完成后，“单元控制”（Element Controls）栏下端显示出用户设置的单元的名称和简单描述，如图 7-48 所示，单击“完成”按钮。



图 7-48 “单元控制”选项卡

在选择了单元类型后，若用户对模型进行了分割，则分割后的模型区域沿用之前的单元类型。若用户重新设置已划分了网格的模型区域的单元类型，则该区域内的网格不会被清除。

用户在选择单元类型时应特别注意，因为 ABAQUS 不会对单元类型的选择进行检查，即使是错误的选择也可以继续操作。

7.4.2 划分网格

在完成种子的设置、网格控制、单元类型的选择后，用户就可以对模型进行网格划分了。如同种子的设置一样，网格划分仍然有非独立实体和独立实体的区别，下面主要介绍非独立实体的网格划分，独立实体只需要将环境栏的“对象”（Object）选择为“装配”（Assembly），就可以进行类似的操作。

单击按钮，拾取要划分网格的部件或者分区，单击中键，即完成一个简单的自由网格划分的操作，如图 7-49 所示。注意局部种子对网格密度的影响，如图 7-50 所示。

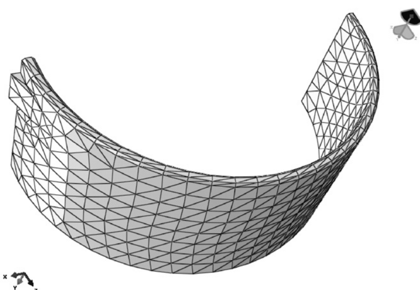


图 7-49　自由网格

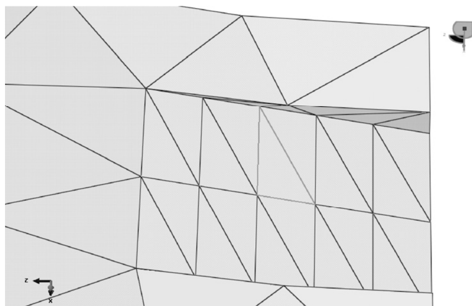


图 7-50　局部种子的影响

若模型较为复杂，则生成四面体网格比较耗时，用户可以先查看边界面上的三角形单元。如果可以接受，就继续对区域内部进行划分；如果不能接受，则可以改变种子和网格控制参数的设置。

若用户删除或重新设置种子以及重新设置网格控制参数（包括单元形状、网格划分技术、网格划分算法、重新定义扫掠路径或角点、最小化网格过渡等），ABAQUS/CAE 会弹出对话框，单击“删除网格”或“确定”按钮删除已划分的网格，之后才能继续操作。

勾选“自动删除无效网格”（Automatically delete meshes invalidated by seed changes）项，再单击“删除网格”或“确定”按钮，那么在以后遇到同样的问题时，不再弹出对话框询问，而是直接删除网格。另外，单元类型的重新设置不需要重新划分网格。

7.5　网格划分进阶技巧

有限元网格数量的多少和质量的好坏直接影响到计算结果的精度和计算规模的大小。一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加，所以在确定网格数量时应该权衡这两个参数。

网格较少时增加网格数量可以显著提高计算精度，而计算时间不会有很大的增加。所以应注意增加网格数量后的经济性。

实际应用时可以比较疏密两种网格划分的计算结果，如果两种计算结果相差较大，应该继续增加网格重新计算，直到误差在允许的范围之内。在此为读者介绍一些优化网格的技巧。

7.5.1 网格检查

打开本节示例文件夹中的模型数据库 ex7.5.cae，已划分好的网格如图 7-51 所示。

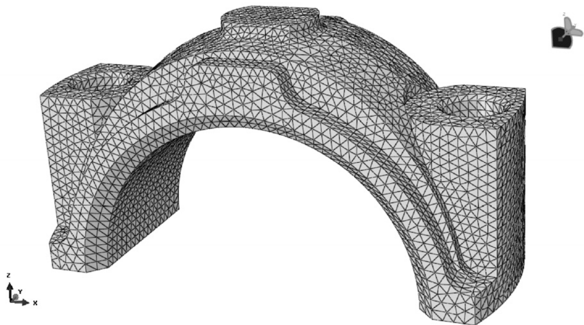


图 7-51　示例网格

网格划分完成后，用户可以进行网格质量的检查。单击工具区中的检查网格（Verify Mesh）工具，或选择“网格（Mesh）→检查（Verify Mesh）”命令，在提示区选择要检查的模型区域，包括 part（部件，适用于非独立实体）或 part instances（部件实体，适用于独立实体）及 geometric regions（几何区域）和 element （单元），选取对应的部件、部件实体或模型分区，单击鼠标中键，弹出“检查网格”（Verify Mesh）对话框，“形状检查”选项卡如图 7-52 所示，“尺寸检查”选项卡如图 7-53 所示。下面对该对话框进行介绍。



图 7-52 “检查网格—形状检查”选项卡



图 7-53 “检查网格—尺寸检查”选项卡

“形状检查”选项卡用于逐项检查单元的形状。“单元形状”（Element Shape）栏列出了选择的模型区域内的所有单元形状。

单击“高亮”（Highlight）按钮，开始网格检查。检查完毕，视图区高亮度显示错误和警告单元，信息区显示单元总数、错误和警告单元数量和百分比、该标准量的平均值和最危险值。

单击“重新选择”（Reselect）按钮，重新选择网格检查的区域；单击“默认值”按钮，使各统计检查项恢复到默认值。

“单元检查标准”（Element Failure Criteria）栏包括以下五种标准：

形状因子小于（Shape factor less than）：该栏用于设置单元的形状因子的下限，仅适用于三角形单元或四面体单元。单元的形状因子表示为单元的面积/体积与具有与该单元相同的外接圆半径的等边三角形/四面体的面积/体积之比，形状因子的取值范围为 0～1，值越大表明该单元的形状越好。

面的顶角小于（Face corner angle less than）：该栏用于设置单元中面的边角的下限。

面的顶角大于（Face corner angle greater than）：该栏用于设置单元中面的边角的上限。

长宽比大于（Aspect ratio greater than）：该栏用于设置单元纵横比（单元最长边与最短边的比）的上限。

边短于（Edge shorter than）：该栏用于设置单元边长的下限。

边长于（Edge longer than）：该栏用于设置单元边长的上限。

分析检查（Analysis checks）：该选项卡用于检查分析过程中会导致错误或警告信息的单元，错误单元用紫红色高亮度显示，警告单元以黄色高亮度显示。

梁（beam）单元、垫圈（gasket）单元和粘合层（cohesive）单元不能使用分析检查。

在提示区中选择“单元”（element），选取要检查的单元，信息区显示该单元对应的各标准的值及是否通过分析检查。

本例检查结果如图 7-54 所示。

信息区中显示检查结果，如图 7-55 所示。

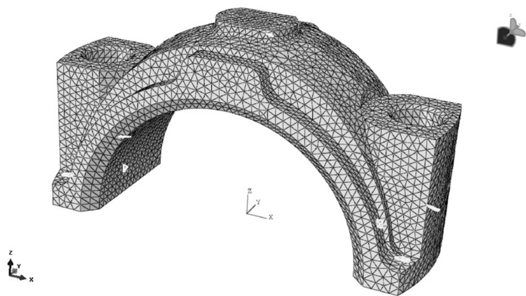


图 7-54　单元检查结果

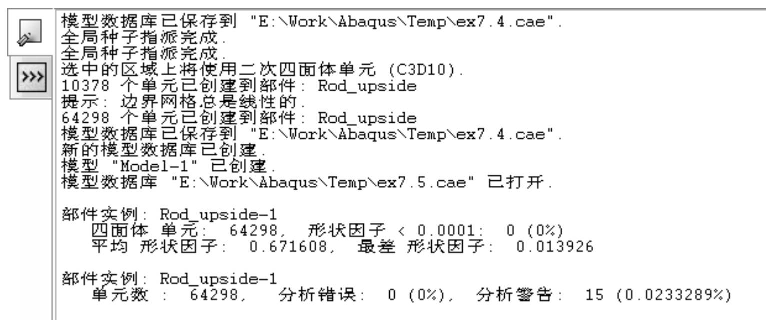


图 7-55　部件单元检查结果信息

7.5.2 高质量的网格

网格质量是决定计算精度和计算效率的重要因素，但是没有判断网格质量好坏的统一标准。为了提高网格质量，有时需要对几何模型和网格进行调整，特别是三维实体模型。本节将介绍提高三维实体模型网格质量的常用方法。

如前所述，在划分网格前，需要设置种子、网格控制参数和单元类型，这些参数的选择直接决定三维实体模型的网格质量。下面总结一些获得高质量网格的参数设置。

- 尽量采用结构（Structured）或扫掠（Sweep）网格划分技术对三维实体模型划分六面体单元。如果单元扭曲较小，建议选用计算精度和效率都高的非协调模式单元；否则选用二次六面体单元。
- 若采用扫掠技术划分网格，中轴（Medialaxis）算法和进阶（Advancingfront）算法的选择没有统一的标准，用户需要针对实际模型进行尝试。一般情况下，选择中轴算法包含的 Minimize the mesh transition 项或进阶算法包含的 Use mapped meshing where appropriate 项，可以提高网格质量。
- 若复杂模型的分割过程过于耗时，用户可以选用二次四面体单元划分网格。建议读者选择 Use mapped trimeshing on bounding faces where appropriate 项，如前所述，ABAQUS/CAE 会对形状简单的面选用映射网格划分，通常可以提高网格质量。另外，若模型的网格密度足够且重点分析区域位于边界，用户可以选择 Increase size of interior elements 项来增加内部单元的尺寸，提高计算效率。
- 网格密度是协调计算精度和计算效率的重要参数，但合适的网格密度往往需要根据具体模型而定。一般情况下，用户可以在重点分析区域和应力集中区域加密种子，

其他区域可以设置相对较稀疏的种子；如果需要控制一些边界区域的结点位置，可以在设置边种子时进行约束。

必要时，用户需要修改或调整几何模型来获得高质量的网格。

■ 分割模型

若不能直接用六面体单元对模型划分网格，用户可以运用分割（Partition）工具将其分割成形状较为简单的区域，并对分割后的区域划分六面体单元。工具可以通过工具箱或主菜单的“工具→分区”命令进行调用，包括 4 个分割线的工具、7 个分割面的工具和 6 个分割体的工具，如图 7-56 所示，其用法请参阅 ABAQUS 相关帮助文件。

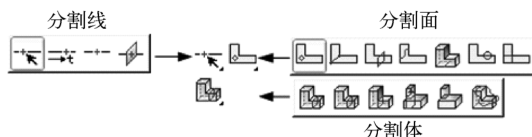


图 7-56　分区工具

■ 编辑几何模型

网格的质量不高或网格划分的失败有时是由几何模型的问题（如无效区域、不精确区域、短边和小面等）引起的。为了获得高质量的网格，用户需要对有问题的模型进行处理，常用工具包括“几何诊断”（Geometry Diagnostics）和“几何修复工具”（Geometry Repair Tools），以及“虚拟拓扑”（Virtual Topology）。下面将介绍这三种工具。

● 几何诊断

首先，用户需要对模型进行几何诊断。单击工具栏中的“查询信息”（Query information）工具，或选择“工具→查询”命令，在弹出的“查询”（Query）对话框中选择“几何诊断”（Geometry diagnostics），如图 7-57 所示，单击“确定”按钮，弹出“几何诊断”（Geometry Diagnostics）对话框，如图 7-58 所示。该对话框可用于诊断模型的无效区域、不精确区域、小尺寸区域等，下面分别进行介绍。



图 7-57 “查询”对话框

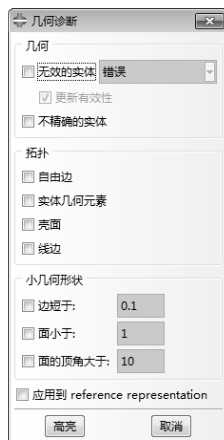


图 7-58 “几何诊断”对话框

✧ 无效的实体（Invalid entities）：该选项用于显示无效区域。ABAQUS 不能分析无效的模型，无效的部件仅能被用做显示体约束（详见第 5 章相互作用（Interaction））。如

果部件包含无效区域，用户必须使用几何编辑工具使之转变为有效模型；若几何修复无效，则用户必须在 CAD 软件中重新建立几何模型，再导入 ABAQUS/CAE。

✧ 不精确的实体（Imprecise entities）：该选项用于显示不精确的区域。在导入模型时，若 ABAQUS/CAE 必须降低精度才能生成实体部件，则这个部件是不精确的。一个有效的（valid）模型可能是精确的或不精确的，ABAQUS 通常能够对不精确的部件划分四面体单元来完成分析。用户可以使用几何编辑工具使之转变为精确模型。

✧ 拓扑（Topology）：该栏用于显示指定的拓扑结构，包括自由边（Free edges）、实体几何元素（Solid cells）、壳面（Shell faces）、线边（Wire edges）。

✧ 小几何形状（Small Geometry）：该栏用于显示小尺寸区域。

■ 边短于（Edges shorter than）：该选项用于显示小于指定长度的短边。指定的长度必须大于 1×10^{-10}，默认长度为“0.1”。

■ 面小于（Faces smaller than）：该选项用于显示小于指定面积的小面。指定的面积必须大于 1×10^{-12}，默认面积为“1”。

■ 面的顶角大于（Face corner angles greater than）：该选项用于显示大于指定角度的尖角。指定的角度必须小于 90°，默认角度为“10”。

单击“高亮”（Highlight）按钮，视图区高亮度显示与已选择的选项对应的区域，信息区显示此次几何诊断的结果。若视图区有高亮度显示，单击提示区右侧的“创建集”（Create Set）按钮创建包含这些区域的集合（Set）。本例的不精确几何形状如图 7-59 所示。

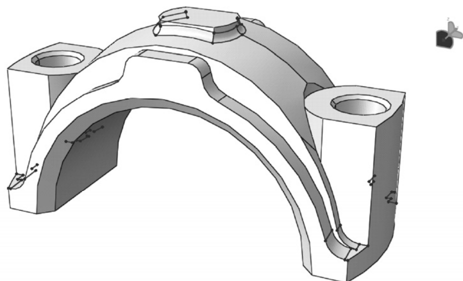


图 7-59 不精确的形状

● 模型的修复

通过几何诊断确定模型中的无效区域、不精确区域或小尺寸区域后，用户可以在“部件”（Part）功能模块中选用合适的几何编辑工具对模型进行编辑，最终在编辑后的模型上生成高质量的网格。几何修复工具可以通过工具区或主菜单的“工具→几何编辑”命令进行调用，如图 7-60 与图 7-61 所示。下面简单介绍这些工具的功能。

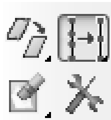


图 7-60 几何修复工具

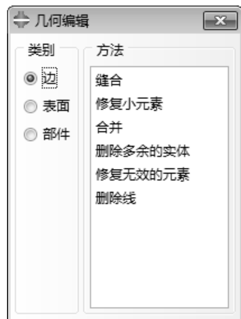


图 7-61 “几何编辑”对话框

● 边（Edge）：该选项用于选择边的修复工具。

✧ 修复小元素（Repair small edges）：用于删除选择的短边，同时修复相邻的边生成

封闭的几何模型。

✧ 合并（Merge edges）：用于合并用户选择的相连接的边，同时删除多余的顶点。

✧ 修复无效的元素（Repair invalid edges）：在导入部件时，少数情况下会产生无效的边，该工具用于修复用户选择的无效边。

✧ 删除多余的实体（Remove redundant entities）：导入的部件可能包含多余的顶点或边，该工具用于删除多余的顶点或边。

✧ 删除线（Remove wire edges）：用于删除线模型的边。

● 表面（Face）：该选项用于选择面的修复工具。

✧ 修复小面（Repair small faces）：用于删除选择的小面，同时修复相邻的面生成封闭的几何模型。

✧ 创建面（Create face）：用于选择封闭的相邻边创建面（壳）。如果创建新的壳后使模型封闭，用户可以使用 Solid from shell 工具用封闭的壳生成体。

✧ 修复面（Repair faces）：用于合并选择的相连接面，生成的面通常比原来的面更光滑。

✧ 修复长条区域（Repair sliver）：用于修复含有狭长区域的面。

✧ 删除面（Remove faces）：用于删除面。如果删除体模型的面，则它转变为壳模型。

● 部件（Part）：该选项用于选择部件的修复工具。

✧ 缝合（Stitch）：用于缝合整个部件的裂缝。

✧ 从壳生成实体（Solid from shell）：用于选择封闭的三维壳来生成体模型。

✧ 修复面法向（Repair face normals）：用于修复实体模型或壳模型的面法向。在导入实体模型时，少数情况下会产生负体积，选择该工具改变体的表面法向，使之具有正体积。在导入壳模型时，有时一些面的法向与壳的法向相反，选择该工具改变这些面的法向；若所有面的法向与壳的法向一致，选择该工具改变壳及所有面的法向。

✧ 转换为解析（Convert to analytical）：选择该工具使模型的形状变得更简单，通常会改进几何形状。

✧ 转换到精确（Convert to precise）：选择该工具使不精确的模型转变为精确的模型，通常会使模型更复杂。

● 虚拟拓扑

模型有时会包含一些小尺寸区域（如小面或短边），这些小尺寸区域往往会增加网格密度或降低网格质量，甚至导致网格划分失败。如果这些小面或短边不是重点分析区域，用户可以在“网格”（Mesh）功能模块中选用“虚拟拓扑”（Virtual Topology）工具对它们进行编辑（用户也可以选用之前介绍的几何修复工具），使网格划分顺利进行。用户可以通过工具箱的工具或“工具→虚拟拓扑”菜单命令调用虚拟拓扑工具。下面简单介绍这些工具的功能。

✧ 合并面（Combine Faces）：用于合并选择的面。

✧ 合并线（Combine Edges）：用于合并选择的线。

■ 编辑有限元模型

对于已划分了网格的模型，用户可以通过“网格→创建网格部件”菜单命令创建仅包含网格的部件。另外，仅包含网格的部件还可以通过“文件→导入→部件”命令导入输出数据库文件（*.odb）得到。用户可以通过“编辑网格”（Edit Mesh）工具来获得高质量的网格，另外，ABAQUS/CAE 还提供自适应网格重划分来提高实体模型的网格质量。

● 编辑网格

单击“编辑网格”（Edit Mesh）工具，或执行“网格→编辑”命令，弹出“编辑网格”（Edit Mesh）对话框，如图 7-62 所示。该对话框中的“撤销”（Undo）和“重做”（Redo）按钮可用于撤销和恢复操作，“设置”（Settings）按钮用于选择是否允许撤销操作以及设置最多能编辑的单元数量。对于划分了网格的模型，见图 7-62 所示的界面；对于仅为网格部件的子集，见图 7-63 所示的界面。下面简单介绍这些工具的功能。



图 7-62 “编辑网格”对话框（划分了网格的模型）



图 7-63 “编辑网格”对话框（网格部件的子集）

✧ 结点：在“类别”栏选择结点用于编辑结点，“方法”栏出现相应的操作。

- 创建：用于在整体坐标系或已创建的局部坐标系中创建结点，仅适用于网格部件。
- 编辑：选择结点，指定它们的坐标偏移，或输入它们在整体坐标系或已创建的局部坐标系中的新坐标。
- 删除：用于删除结点，与该结点相连的单元也同时被删除，仅适用于网格部件。
- 合并：用于合并选择的结点，仅适用于网格部件。
- 调整中点：选择二次单元的边结点，调整与该结点相连的中结点的位置，仅适用于网格部件。

✧ 单元：在“类别”栏选择“单元”用于编辑单元，“方法”栏出现相应的操作。

- “创建”：用于创建单元，仅适用于网格部件。用户需要先在提示区选择单元形状，然后在视图区按顺序选择结点来创建单元。
- 删除：用于删除单元，可以选择是否删除不属于任何单元的结点，仅适用于网格部件。
- 法向反向：用于改变壳单元的法向，仅适用于网格部件。

■ 堆叠方向：用于指定四边形、六面体和楔形单元的堆叠方向，仅适用于网格部件。
■ 合并边（三角形/四边形）：选择三角形或四边形单元的一条边，使边上的两个结点合并为一个结点，单元沿着指定的方向折叠。
■ 分割边（三角形/四边形）：选择三角形或四边形单元的一条边，在边上指定的位置创建结点，该结点分割该边并与周围结点连接生成新的单元。
■ 交换对角线（三角形）：选择两个相邻三角形单元的公共边，该工具用于交换两个三角形单元组成的四边形的对角线，原来的两个三角形单元也随之改变。
■ 分割（四边形到三角形）：用于将选择的四边形单元分割成两个三角形单元。
■ 合并（tri to quad）：用于将选择的两个三角形单元合并成一个四边形单元。

✧ 网格：在“类别”栏选择网格用于编辑整个网格，仅适用于网格部件，“方法”栏出现相应的操作。
✧ 偏移（创建实体）：选择三维实体单元或三维壳单元的表面，沿该面的法线方向生成一层指定厚度的三维实体单元。
✧ 偏移（创建壳）：选择三维实体单元或三维壳单元的表面，生成一个与该面形状相同的壳单元，并沿该面的法线方向偏移指定的距离。
✧ 合并短边：用于合并边长小于指定长度的边上的两个结点，适用于只包含线性三角形单元的网格。
✧ 转换三角形为四面体：用于将仅包含线性三角形单元的封闭网格转换成包含四面体单元的网格。
✧ 包裹网格：将位于 XY 面内的平面网格按指定半径绕整体坐标 Z 轴卷曲，该功能只能通过 Python 脚本语言实现。

● 自适应网格重划分

若对模型划分了四面体网格、三角形自由网格或进阶算法的四边形占优的自由网格，则用户可以使用“网格”模块中的“自适应性”菜单定义自适应网格重划分规则，进而在“作业”功能模块中运行网格自适应过程。下面简单介绍自适应网格重划分规则的创建。

单击工具箱中的“创建网格重划分规则”（Create Remeshing Rule）工具，或执行“自适应（Adaptivity）→网格重划分规则管理器（Remeshing Rule）→创建（Create）”命令，选择模型区域，弹出“创建网格重划分规则”对话框，如图 7-64 所示。该对话框包括如下选项。

✧ 名称（Name）：该栏用于输入自适应网格重划分规则的名称。
✧ 描述（Description）：该栏用于输入对该自适应网格重划分规则的简单描述。
✧ 分析步和索引（Step and Indicator）：该选项卡用于选择分析步和误差指示变量。

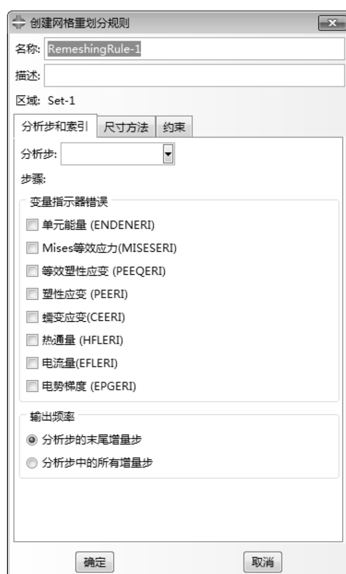


图 7-64 “创建网格重划分规则”对话框

- 分析步（Step）：该栏用于选择该自适应网格重划分规则的分析步，适用于ABAQUS/Standard 分析中的静态分析（通用分析部或线性摄动分析步）、准静态分析、热－力耦合分析、热－电耦合分析和传热分析等。
- 变量指示器错误（Error Indicator Variables）：该栏用于选择误差指示变量。



- 输出频率（Output Frequency）：该栏用于选择误差指示变量写入输出数据库的频率。
  - 分析步的末尾增量步（Last increment of step）：此为默认选项，在该分析步的最后一个增量步结束后写入误差指示变量。ABAQUS/CAE 根据最后一个增量步的误差指示变量对模型进行网格重划分。
  - 分析步中的所有增量步（All increments of step）：在该分析步的每个增量步结束后都写入误差指示变量。若分析不收敛，用户可以使用最近输出的误差指示变量进行手工网格重划分。

✧ 尺寸方法（Sizing Method）：该选项卡用于选择计算单元尺寸的方法。

- 默认方法和参数（Default method and parameters）：采用默认方法进行计算，即Element energy（单元能量）和 Heat flux（热通量）采用 Uniform error distribution 算法，其他误差指示变量采用 Minimum/maximum control 算法。
- 一致错误分布（Uniform error distribution）：采用统一误差分布网格尺寸算法，使模型区域内的每个单元都满足误差目标。
  - 自动目标减缩（Automatic target reduction）：此为默认选项，ABAQUS 自动设置误差目标。
  - 固定目标（Fixed target）：该选项用于设置误差目标。
- 最小最大控制（Minimum/maximum control）：采用最小/最大控制网格尺寸算法。
  - 自动目标减缩（Automatic target reduction）：此为默认选项，ABAQUS 自动设置最小和最大的误差目标。
  - 固定目标（Fixed target）：该选项用于设置最小（Minimum）和最大（Maximum）的误差目标。最大误差目标被用到结果（如应力）最高的附近区域，最小误差目标被用到结果最低的附近区域。
- 网格偏心（Mesh Bias）：该栏用于设置网格尺寸分布，滑动条滑向 Strong 表明细化高结果值附近更大区域的网格。

✧ 约束（Constraints）：该选项卡用于设置对单元尺寸的约束。

- 单元大小（Element Size）：该栏用于设置最小和最大的单元尺寸。自动计算（Auto-compute）为默认设置，ABAQUS/CAE 自动计算最小和最大的单元尺寸，最小单元尺寸为计算前的边界种子的 1%，最大单元尺寸为计算前的边界种子的 10 倍。选择“指定”（Specify），用户指定最小和最大的单元尺寸。
- 变化率限制（Rate Limits）：该栏用于设置网格细化（Refinement）或粗化（Coarsening）的速率。Use default 为默认设置，ABAQUS/CAE 采用中间值 5。选择“指定”（Specify），用户指定网格细化/粗化的速率，滑动条滑向 High 表明加速网格的细化/粗化。选择 Do not refine/Do not coarsen，阻止单元尺寸的减小/增加。

若想进一步了解自适应网格重划分，请参阅 ABAQUS 帮助相关章节。

如果用户在同一分析步中对模型同一区域创建多个自适应网格重划分规则，则

ABAQUS/CAE 采用产生最密网格的规则。如果对非独立实体运行网格自适应过程，则选择的部件和用该部件创建的所有实体都被重新划分网格。

7.6 本章小结

ABAQUS 拥有广泛适用于各类结构的庞大的单元库。单元类型的选择对模拟计算的精度和效率有重大的影响。

单元结点的有效自由度依赖于此结点所在的单元类型。

单元的名字完整地标明了单元族、单元的列式、结点数及积分类型。

所有的单元都必须指定截面特性，它不仅可用来提供定义单元几何形状所需的附加数据，而且还可以用来识别相关的材料性质定义。

对于实体单元，ABAQUS 参照整体笛卡儿坐标系来定义单元的输出变量，如应力和应变。分析中，可以把整体坐标系转为局部材料坐标系。

对于三维壳单元，ABAQUS 参照位于壳表面上的坐标系来定义单元的输出变量，用户可自行定义一个局部材料坐标系。

为了提高计算效率，模型中的任何部分都可以定义为一个刚性体，它仅仅在其参考点上有自由度。



第 8 章　作　　业

创建作业（Job）是计算前的最后一个操作。在“作业”模块中可以对将要进行的分析进行最后的设置，控制计算机的行为，提高分析效率。

本章学习目标

- 掌握作业模块的使用方法
- 掌握 ABAQUS 各模块的逻辑关系
- 掌握作业创建与管理的方法
- 了解网格自适应过程

8.1　作业模块

用户设置完成本章之前所有模块后，才能进入“作业”（Job）功能模块对模型进行分析，之后在“可视化”（Visualization）模块中进行结果后处理。

8.1.1　各功能模块调用逻辑

一般而言，首先在“部件”（Part）模块中创建部件（有时需要与“装配”（Assembly）模块配合使用），之后在“装配”（Assembly）模块中进行部件的装配。

用户可以在进入“相互作用”（Interaction）模块和“载荷”（Load）模块之前的任何时候，在“分析步”（Step）模块中定义分析步和变量输出要求。

在“装配”和“分析步”完成定义的基础上，在“相互作用”（Interaction）模块中定义相互作用、约束或连接器以及在“载荷”模块中定义载荷、边界条件、预定义场或工况，这两个模块通常没有先后顺序的要求。

在部件创建（使用“部件”（Part）模块）后，“作业”（Job）模块之前的任何时候，用户都可以进入“属性”（Property）模块进行材料和截面属性的设置。

如果在“装配”（Assembly）模块中创建的是非独立实体，则用户可以在创建部件（使用“部件”（Part）模块）后，“作业”（Job）模块之前的任何时候，在“网格”（Mesh）模块中对部件进行网格划分。

如果在“装配”（Assembly）模块中创建的是独立实体，则用户可以在创建装配件（使用“装配”（Assembly）模块）后，“作业”（Job）模块之前的任何时候，在“网格”（Mesh）模块中对装配件进行网格划分。

图 8-1 列出了非独立实体的功能模块操作顺序，图 8-2 列出了独立实体的功能模块操作顺序。

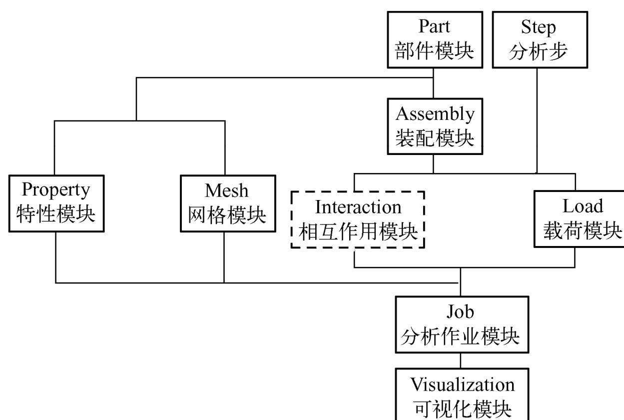


图 8-1 非独立实体的功能模块操作顺序

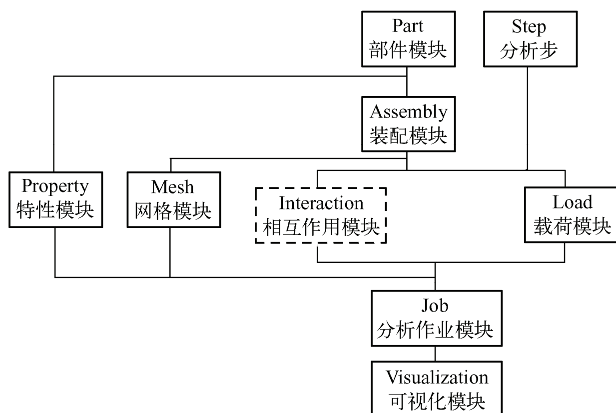
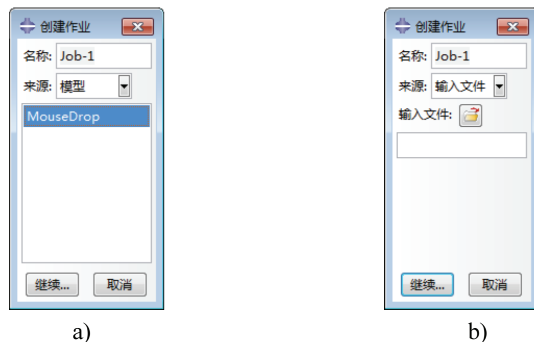


图 8-2 独立实体的功能模块操作顺序

8.1.2 创建作业

进入“作业”（Job）功能模块后，主菜单中的 Job 菜单及工具区中第一行的“创建作业”（Create Job）工具和“作业管理器”（Job Manager）工具用于作业的创建和管理。

单击工具区中的（创建作业，Create Job）工具，或选择“作业（Job）→创建（Create）”命令，弹出“创建作业”（Create Job）对话框，如图 8-3 所示。该对话框包括两个部分：



a) b)

图 8-3 “创建作业”对话框

a) 来源为“模型” b) 来源为“输入文件”

名称（Name）：在该栏内输入作业的名称，默认为 Job-n（n 表示第 n 个创建的作业）。

来源（Source）：该列表用于选择作业的来源，包括“模型”（Model）和“输入文件”（Input file）。

默认选择为“模型”（Model），其下部列出该 CAE 文件中包含的模型，如图 8-3a 所示。用户需要从该列表中选择用于创建作业的模型。

若用户选择“输入文件”（Input file），则可以单击按钮选择用于创建作业的.inp 文件，或在其下的空格内输入，如图 8-3b 所示。

设置完成后，单击“继续”（Continue）按钮，弹出“编辑作业”（Edit Job）对话框，如图 8-4 所示，用户需要在该对话框中进行分析作业的编辑。

“编辑作业”对话框包含如下内容。

描述（Description）：该栏用于输入对该分析作业的简单描述，并保存在结果数据库中，进入“可视化”（Visualization）模块后显示在标题区。该栏非必选项，用户可以不对分析作业进行描述。

■ “提交”（Submission）选项卡，如图 8-4a 所示，用于设置分析作业的提交参数。

● 作业类型（Job Type）：该栏用于选择分析作业的类型。

✧ 完全分析（Full analysis）：此为默认选项，对模型执行一个完整的分析，将分析结果写入到输出数据库。

✧ 恢复(Explicit)（Recover (Explicit)）：完成一个 ABAQUS/Explicit 意外停止的分析，仅适用于 ABAQUS/Explicit。

✧ 重启动（Restart）：该选项用于完成一个重启动分析。重启动分析需要的文件包括输出数据库文件（job_name.odb）、重启动文件（job_name.res）、模型文件（job_name.mdl）、部件信息文件（job_name.prt）、状态外文件（job_name.stt），ABAQUS/Explicit 分析还需要状态文件（job_name.abq）、打包文件（job_name.pac）和结果选择文件（job_name.sel）。用户可以在“分析步”模块设置重启动信息的写入频率，默认情况下，对于 ABAQUS/Standard 分析，无重启动信息的写入；对于 ABAQUS/Explicit 分析，仅在分析步的开始和结束时写入重启动信息。用户不能对来自.inp 文件的分析作业进行重启动分析。

● 运行模式（Run Mode）：该栏用于选择运行模式。

✧ Background：此为默认选项，ABAQUS 在后台运行分析。

✧ 队列（Queue）：该栏用于选择已定义的批处理队列提交分析作业。

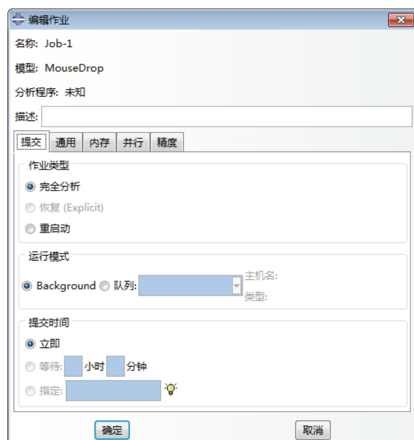
● 提交时间（Submit Time）：该栏用于选择运行分析的时间。

✧ 立即（Immediately）：此为默认选项，分析作业立即在后台被执行或立即被提交到批处理队列。

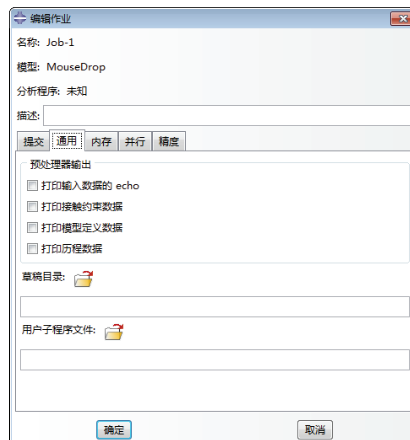
✧ 等待（Wait）：在指定的等待时间后运行分析。该选项仅在 UNIX 操作系统下可用，且仅适用于后台运行模式（Background）。

✧ 指定（At）：在指定的时间运行分析。对于后台运行模式（Background），该选项仅在 UNIX 操作系统下可用。

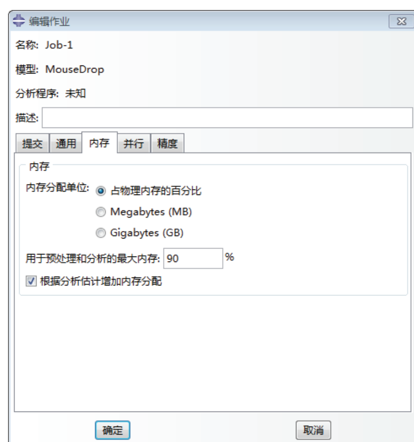
■ “通用”（General）选项卡（如图 8-4b 所示）用于指定一些分析作业设置。



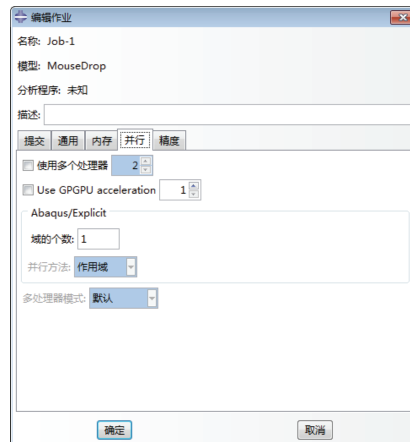
a)



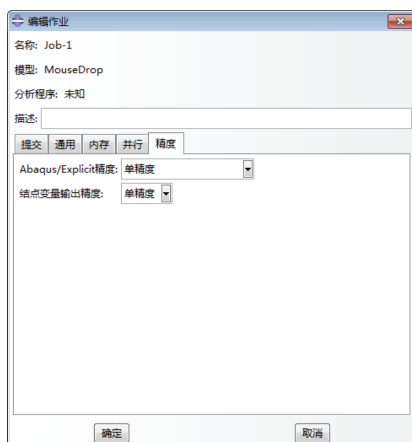
b)



c)



d)



e)

图 8-4 “编辑作业”对话框

a) “提交”选项卡 b) “通用”选项卡 c) “内存”选项卡 d) “并行”选项卡 e) “精度”选项卡

- 预处理器输出（Preprocessor Printout）：该栏用于选择预处理打印输出。ABAQUS 会将用户选择的项输出到数据文件（job_name.dat）中。对于来自.inp 文件的分析作业，用户需要在.inp 文件中指定预处理打印输出。
- 草稿目录（Scratch directory）：选择用于保存分析过程中临时文件的文件夹。
- 用户子程序文件（User subroutine file）：该栏用于选择包含用户子程序的文件。

■ “内存”（Memory）选项卡如图 8-4c 所示，用于指定分配到分析中的内存。

- 内存分配单位：用于指定分配内存的方式。

✧ 占物理内存百分比：用于预处理和分析的最大内存占计算机物理内存的百分比。

✧ Megabytes（MB）：以 MB 为单位定义用于预处理和分析的最大内存。

✧ Gigabytes（GB）：以 GB 为单位定义用于预处理和分析的最大内存。

- 根据分析估计增加内存分配：勾选该项后，当分析需要，有可能超出用户定义的内存分配。

■ “并行”（Parallelization）选项卡如图 8-4d 所示，用于并行运算的设置。

- 使用多个处理器（Use multiple processors）：选择用于分析的处理器数目，默认值为“1”，即不使用并行运算。
- Use GPGPU acceleration：使用 GPGPU 加速。

✧ Abaqus/Explicit：该栏用于选择 ABAQUS/Explicit 分析的设置。

✧ 域的个数（Number of domains）：该栏用于输入域的数目。

✧ 并行方法（Parallelization method）：该栏用于选择并行方法，包括“作用域”（Domain，拓扑域并行）和“循环”（Loop，循环级并行）。

- 多处理器模式（Multi-processing mode）：该列表用于选择多处理器模式，包括“默认”（Default，基于执行分析的平台）、“线程”（Threads，多线程方式）和 MPI（消息传输平台），其中后两种模式仅适用于拓扑域并行（Domain）。

■ “精度”（Precision）选项卡，如图 8-4e 所示，用于精度的控制。

- Abaqus/Explicit 精度（ABAQUS/Explicit precision）：该列表用于选择 ABAQUS/Explicit 分析的精度，包括“单精度”、“强制关闭”、“两者-只分析”、“两者-只约束”和“两者-分析+packager”。
- 结点变量输出精度（Nodal output precision）：该列表用于选择结点输出的精度，包括“单精度”（Single）和“完全”（Full）。

8.1.3 管理作业

如图 8-5 所示为 ABAQUS 的“作业管理器”对话框。

■ “写入输入文件”（Write Input）按钮

用于在工作目录中生成该模型的.inp 文件，该按钮等同于主菜单中的“作业（Job）→写入输入文件（Write Input）”命令。

■ “提交”（Submit）按钮

用于提交分析作业，该按钮等同于主菜单中的“作业（Job）→提交（Submit）”命令。

用户提交分析作业后，管理器中的“状态”（Status）栏会相应地改变。

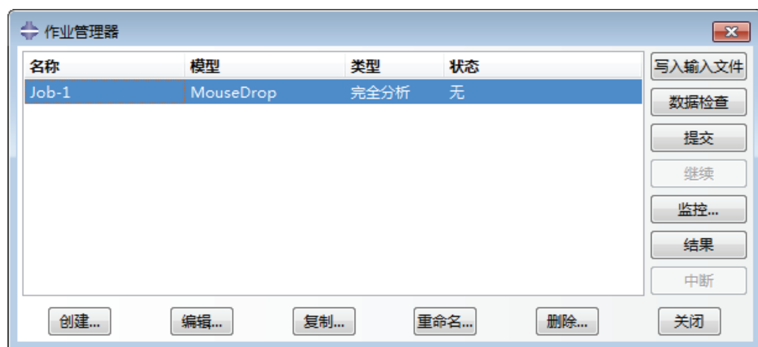


图 8-5 “作业管理器”对话框

- “无”（None）表示没有提交分析作业；“已提交”（Submitted）表示已生成.inp 文件，分析作业正在被提交；
- “运行中”（Running）表示分析作业已经被提交，ABAQUS 正在运行分析作业；“完成”（Completed）表示完成分析，结果已按要求写入到输出数据库；
- “中断”（Aborted）表示由于.inp 文件或分析中的错误而导致分析失败，用户可以在信息区或监控器中查看错误；
- “终止”（Terminated）表示分析被用户终止（用户单击了“中断”（Kill）按钮）。

若用户希望通过编辑.inp 文件来修改模型，除了直接进行.inp 文件的编写外，还可以使用以下两种方式。

- 单击“写入输入文件”（Write Input）按钮生成.inp 文件，在 ABAQUS/CAE 外使用文字编辑器对该.inp 文件进行编辑后，再重新创建分析作业，在“创建作业”（Create Job）对话框的“来源”（Source）中选择“输入文件”（Input file）。
- 在 ABAQUS/CAE 中选择“模型（Model）→编辑关键字（Edit Keywords）”命令进行关键字的编辑，再提交分析作业。

■ “监控”（Monitor）按钮

用于打开分析作业监控器，如图 8-6 所示，该按钮等同于主菜单中的“作业（Job）→监控（Monitor）”命令。该对话框中的上部表格显示分析过程的信息，这部分信息也可以通过状态文件（Job_name.sta）进行查阅。其下部包括四个选项卡页面。

- “日志”（Log）选项卡页面用于显示分析各阶段的时间，这部分信息也可以通过日志文件（Job_name.log）进行查阅。
- “错误”（Errors）选项卡页面用于显示分析过程中的错误信息，这部分信息也可以通过数据文件（Job_name.dat）、信息文件（Job_name.msg）或状态文件（Job_name.sta）进行查阅。
- “警告”（Warnings）选项卡页面类似于错误（Errors）页面，用于显示分析过程中的警告信息。
- “输出”（Output）选项卡页面用于记录输出数据的录入。

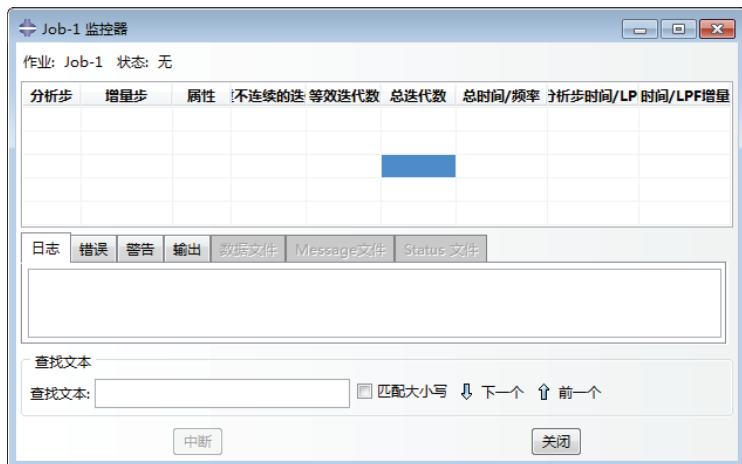


图 8-6 “监控器”对话框

8.2 网格自适应过程

若用户在“网格”(Mesh)功能模块中定义了自适应网格重划分规则，则可以对该模型进行自适应过程操作。ABAQUS/CAE 根据自适应网格重划分规则对模型重新划分网格，进而完成一系列连续的分析作业，直到结果满足自适应网格重划分规则，或已完成指定的最大迭代数，亦或分析中遇到错误。

单击工具区中的“创建自适应过程”(Create Adaptivity Process)工具，或选择“自适应（Adaptivity）→创建（Create）”命令，弹出“创建自适应过程”（Create Adaptivity Process）对话框，如图 8-7 所示。该对话框与“编辑作业”(Edit Job)对话框类似，本节重点介绍与“编辑作业”(Edit Job)对话框不同的部分。

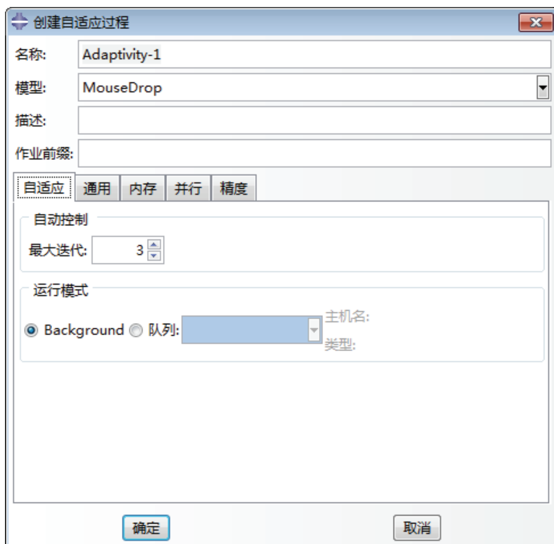


图 8-7 “创建自适应过程”对话框

■ 名称（Name）：在该栏内输入自适应过程的名称，默认为 Adaptivity-n（n 表示第 n 个创建的自适应过程）。
■ 模型（Model）：该列表用于选择创建自适应过程的模型。
■ 描述（Description）：该栏用于输入对该自适应过程的简单描述。
■ 作业前缀（Job Prefix）：该栏用于输入该自适应过程中每个分析作业名称的前缀。若不输入，ABAQUS/CAE 则采用默认的 Adaptivity-n-iterm（其中 n 表示第 n 个创建的自适应过程，m 表示第 m 次迭代）。
■ 自适应（Adaptivity）：该选项卡页面用于设置自适应过程的参数。
● 最大迭代（Maximum iterations）：该栏用于设置最大迭代次数。
● 运行模式（Run Mode）：该栏用于选择运行模式，与“编辑作业”（Edit Job）对话框对话框的设置相同，不再赘述。
■ 通用（General）：该选项卡页面用于设置预处理打印输出、临时文件夹和用户子程序，与“编辑作业”（EditJob）对话框的设置相同，不再赘述。
■ 内存（Memory）：该选项卡页面用于指定分配到分析中的内存，与“编辑作业”（Edit Job）对话框的设置相同，不再赘述。随着网格的细化，分析需要的内存会相应地增加。用户在设置最大内存分配时，应该考虑到最后一次迭代所需要的内存大小。
■ 并行（Parallelization）：该选项卡页面用于并行运算的设置，与“编辑作业”（Edit Job）对话框的设置相同，不再赘述。
■ 精度（Precision）：该选项卡页面用于精度的控制，仅包含结点变量输出精度（Nodal output precision），与“编辑作业”（Edit Job）对话框的设置相同，不再赘述。设置完成，单击“确定”按钮。

单击“自适应过程管理器”（Adaptivity Process Manager）工具，已创建的自适应过程出现在管理器中，如图 8-8 所示。用户可以单击该管理器右侧的“提交”（Submit）按钮提交该自适应过程。

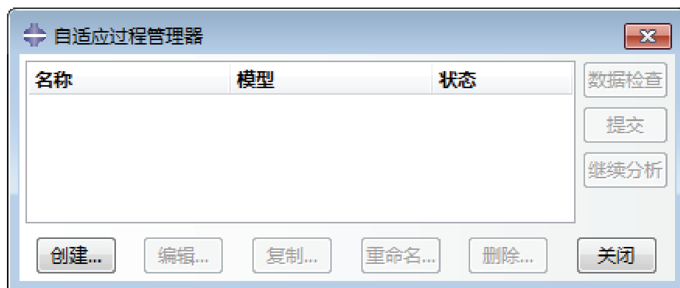


图 8-8 “自适应过程管理器”对话框

然而，用户需要在“作业管理器”中进行自适应过程的监控、终止和每个迭代的结果后处理操作。

建议读者在运行自适应过程之前，打开“作业管理器”。如同分析作业的管理，可以单击“监控”（Monitor）按钮打开监控器，单击“中断”（Kill）按钮终止正在运行的迭代，单击“结果”（Results）按钮进入“可视化”（Visualization）功能模块对该迭代的结果进行后处理。

8.3 本章小结



本章为读者讲解“作业”模块的功能。

到本章为止，读者应具有完成一个 ABAQUS 分析的基本能力，可以通过操作得到正确的计算结果（尽管不一定是工程上的合理结论或最终分析目标）。

本章为读者介绍的功能主要是为充分利用计算平台的性能而进行的设置，与基础理论关系较少。

本章中介绍的网格自适应过程是一个网格自动优化技术，用户可以利用此功能得到更为合理的网格。

第 9 章　后处理与数据可视化

ABAQUS 的“可视化模块”（Visualization）用于模型的结果后处理，可以显示.odb 文件中的计算分析结果，包括变形前/后的模型图、各种变量的分布云图、矢量/张量符号图、材料方向图、变量的 X–Y 图表、动画，以及以文本形式选择性输出的各种变量的具体数值。这些功能及其控制选项都包含在“结果”（Result）、“绘图”（Plot）、“动画”（Animate）、“报告”（Report）、“选项”（Options）和“工具”（Tools）菜单中，其中大部分功能还可以通过工具区中的工具进行调用。



图 9-1 “可视化”模块的工具

本章学习目标

- 掌握 ABAQUS 后处理方法
- 掌握可视化模块的使用方法
- 掌握不同类型的结果显示方法
- 掌握进行图表输出的方法
- 掌握在 ABAQUS 中制作动画的方法

9.1　在模型上显示结果

接下来将以一个.odb 文件为例，介绍“可视化”模块中进行后处理的方法。在“可视化”模块中，工具区中的工具可以涵盖大多数功能的调用，如图 9-1 所示。

9.1.1 变形图

“变形图”按钮可以使模型在变形与原始状态间切换。如图 9-2 所示为模型变形前，图 9-3 所示为变形图。

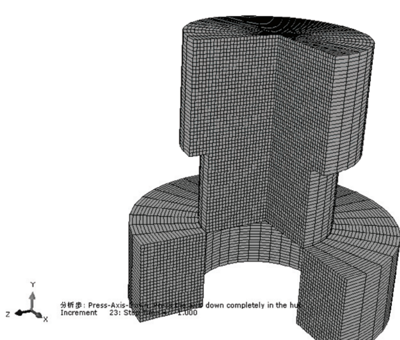


图 9-2　变形前

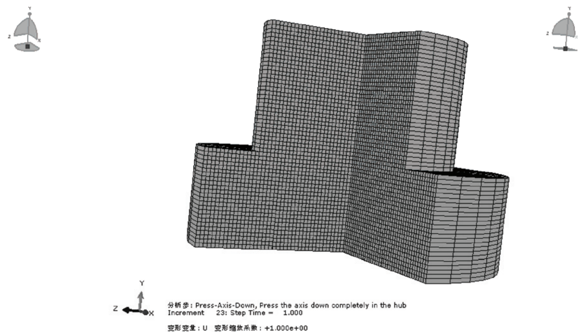


图 9-3　变形图

9.1.2 云图

单击按钮，在视图区中显示云图如图 9-4 所示，系统默认状态下为 Mises 应力云图，是.odb 文件的最后一个分析步的 INC 最大的帧。

单击按钮，弹出图 9-5 所示的“场输出”对话框，在该对话框中可选择输出变量的类型与绘图方式。

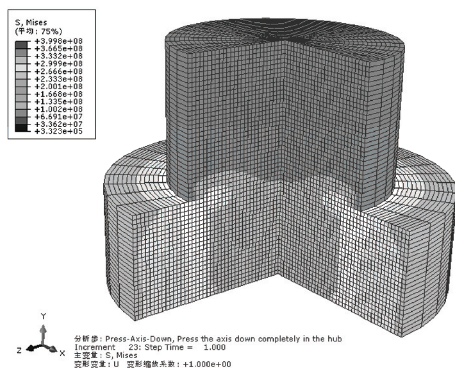


图 9-4　Mises 应力云图

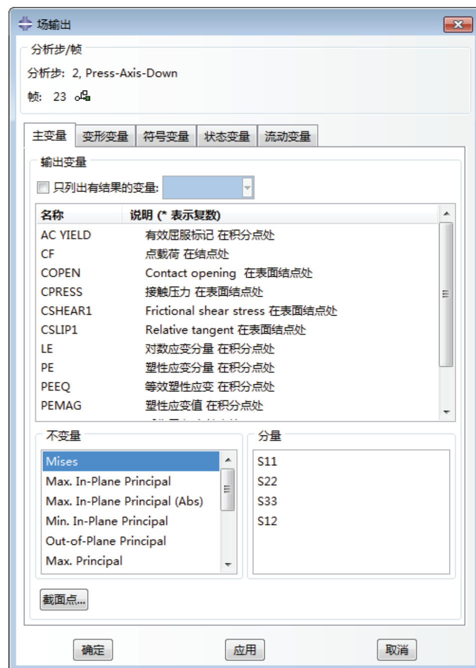


图 9-5　“场输出”对话框

当选择 RF，即显示反作用力时，视图区中显示如图 9-6 所示。图 9-7 所示为对数应变图。图 9-8 所示为接触点分离图。图 9-9 所示为接触应力图。图 9-10 所示为摩擦剪应力图。图 9-11 所示为相对速率图。

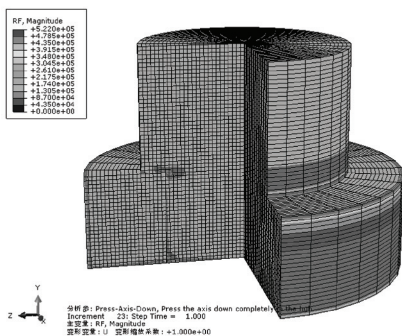


图 9-6　反作用力云图

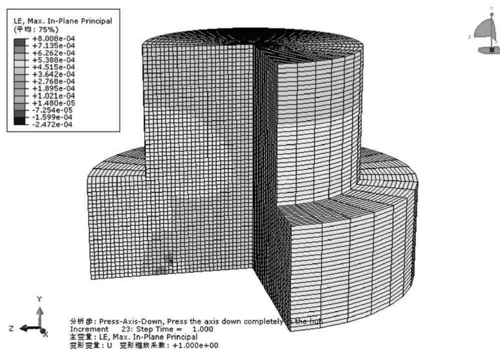


图 9-7　对数应变

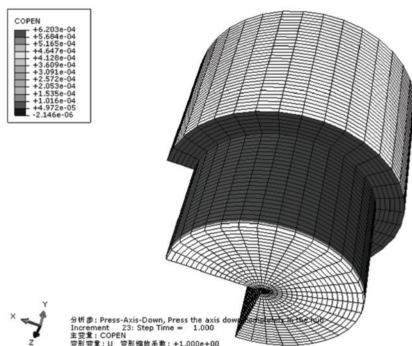


图 9-8　接触点分离

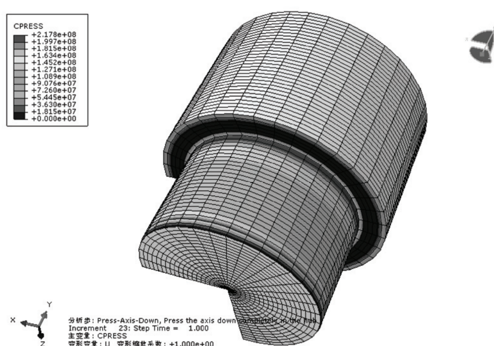


图 9-9　接触应力

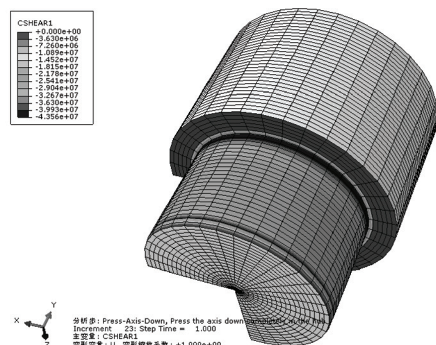


图 9-10　摩擦剪应力

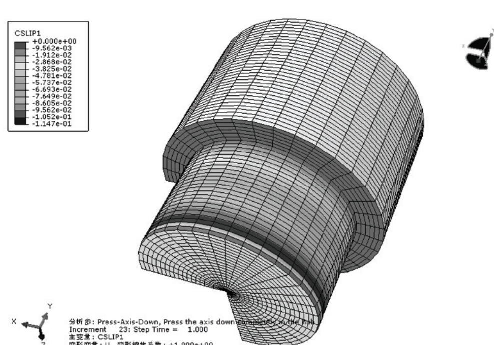


图 9-11　相对速率

在图 9-5 所示的“场输出”对话框中还可以选择各变量的分量如图 9-12 所示。以应力为例，图 9-13 S11 云图为 X 轴拉/压应力云图。图 9-14 所示 S22 云图为 Y 轴拉/压应力云图。图 9-15 所示 S33 云图为 Z 轴拉/压应力云图。

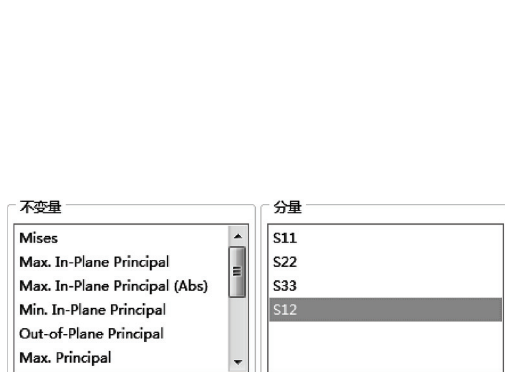


图 9-12　选择变量的分量

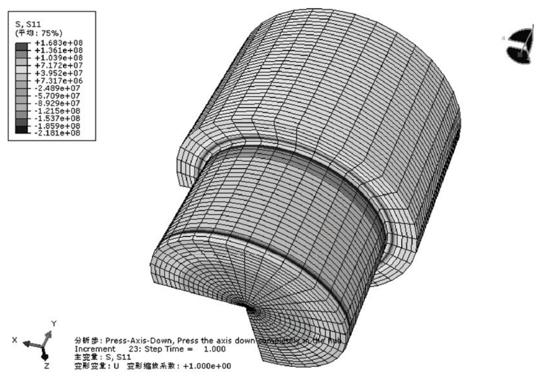


图 9-13　S11 云图

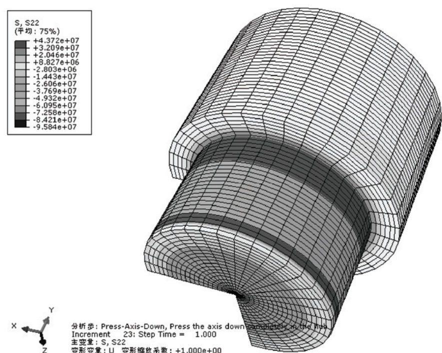


图 9-14　S22 云图

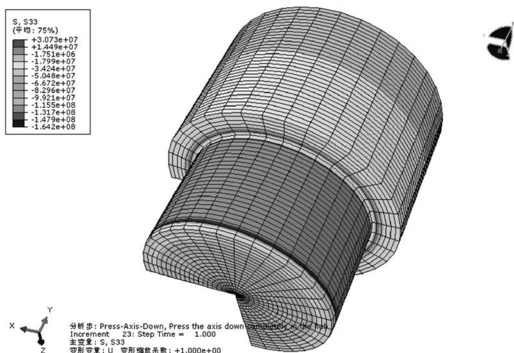


图 9-15　S33 云图

单击工具区中的“通用绘图选项”（Common Options）工具，或选择“选项（Options）→通用（Common）”命令，弹出“通用绘图选项”（Common Plot Options）对话框，如图 9-16 所示。该对话框包括 5 个选项卡。

“基本信息”（Basic）选项卡包括 3 个单选区，分别用于着色方式、边的显示方式的选择和变形比例系数的设置。

渲染风格（Render Style）：该栏用于选择着色方式。

线框（Wireframe）：仅显示线条框架。此功能可以通过选择工具栏中的 Render Model→Wireframe 工具实现。

消隐（Hidden）：隐藏内部线条和该视角下不可见的外部线条，仅显示可见的外部结构框架。此功能可以通过选择工具栏中的 Render Model→Hidden 工具实现。

填充（Filled）：将外部表面按一致的颜色（默认为绿色）进行着色，显示实体。此功能可以通过选择工具栏中的 Render Model→Filled 工具实现。

阴影（Shaded）：此为默认选项，在填充（Filled）的基础上考虑光照和阴影效果，显示更加真实的三维视觉效果。此功能可以通过选择工具栏中的 Render Model→Shaded 工具实现。

可见边（Visible Edges）：该栏用于选择边的显示方式。该栏的选项需要和“渲染风格”（Render Style）栏的选项配合使用。

所有边（All edges）：显示所有边。只有在“渲染风格”栏选择“线框”时，视图区才能显示模型内部的边。

外部边（Exterior edges）：此为默认选项，只显示模型外部的边。

特征边（Feature edges）：只显示模型外部的特征边。当模型的外部单元外表面法线间的角度大于指定的特征角度时，这些单元外部的边显示出来。“特征角度”可以通过选择“视图（View）→ODB 显示选项（ODB Display Options）”命令打开“ODB 显示选项”（ODB Display Options）对话框，在“通用”（General）选项卡的 Feature Angle 栏进行设置。当“特征角度”设置为“0”时，与“外部”（Exterior edges）选项的显示相同；当“特征角度”设置为“90”时，与自由边（Free edges）选项的显示相同。

自由边（Free edges）：显示仅属于一个单元的边。该选项可用于显示模型中的孔洞和裂缝。

无（No edges）：不显示单元的所有边，仅适用于“渲染风格”（Render Style）栏选择“填充”（Filled）或“阴影”（Shaded），如图 9-17 所示。

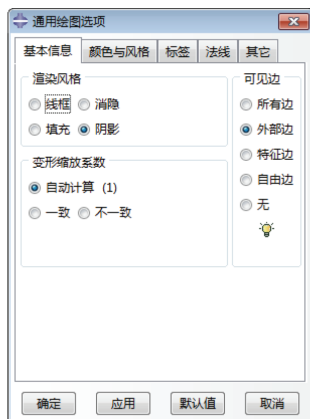


图 9-16 “通用绘图选项”对话框（“基本信息”选项卡）

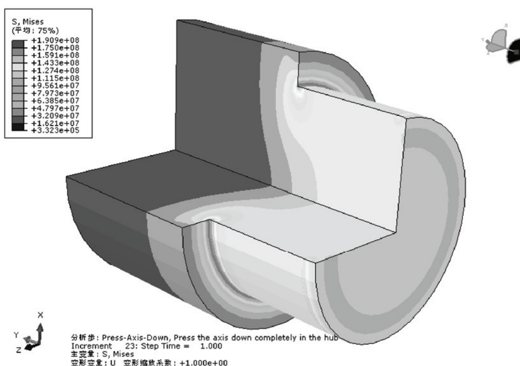


图 9-17 不显示单元所有边

变形缩放系数（Deformation Scale Factor）：该栏用于设置变形比例系数。

自动计算（Auto-compute）：此为默认选项，ABAQUS/CAE 自动选择一个合适的比例系数进行显示。

一致（Uniform）：该选项用于设置一个统一的变形比例系数。选择此选项后，用户需在其下方出现的“Value”栏内输入一个比例系数，如图 9-18 所示。

不一致（Nonuniform）：该选项用于分别设置三个方向的变形比例系数。选择此选项后，用户需在其下方出现的 X、Y、Z 栏内分别输入与该方向对应的比例系数，如图 9-19 所示。

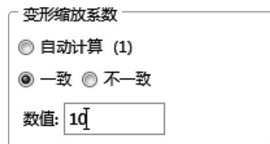


图 9-18 一致缩放系数选项

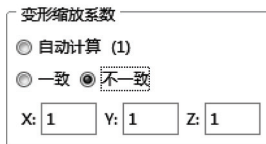


图 9-19 不一致缩放系数选项

颜色与风格（Color&style）：该选项卡用于设置模型颜色和边的线型，如图 9-20 所示。

线框/消隐图中的边（Edges in wireframe/hidden plots）：在“基本信息”选项卡的“渲染风格”栏选择“线框”或“消隐”时，该栏用于选择线的颜色，默认为绿色。

填充/阴影图中的边（Edges in filled/shaded plots）：在“基本信息”选项卡的“渲染风络”栏选择“填充”或“阴影”时，该栏用于选择线的颜色，默认为黑色。

在填充阴影图中填充颜色（Fill color in filled/shaded plots）：该栏用于选择实体的填充颜色，默认为绿色，适用于在“基本信息”选项卡的“渲染风络”栏选择“填充”或“阴影”的情况。

允许颜色代码选择集覆盖此对话框中的选项（Allow color codes elections to override options in this dialog）：默认为选择该项，允许色码（Color Code）的选择优先于该对话框的选择。色码通过工具栏中的工具进行编辑和选择。

风格（Style）：该列表用于选择边的线型。

厚度（Thickness）：该列表用于选择边线的粗细程度。

标签（Labels）：该选项卡用于设置单元、结点的编号和标记，如图 9-21 所示。

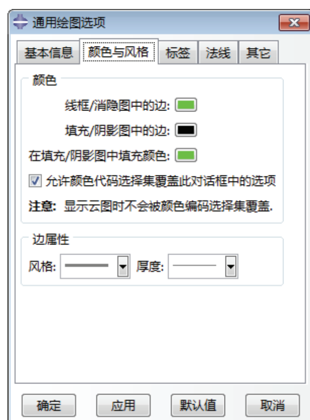


图 9-20 “颜色与风格”选项卡

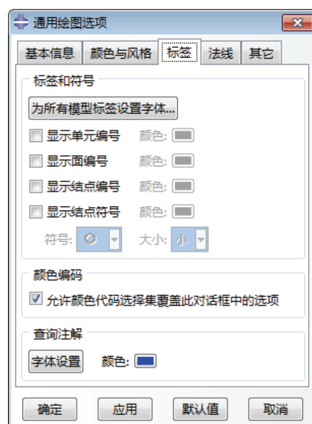


图 9-21 “标签”选项卡

为所有模型标签设置字体（Set Font for All Model Labels）：该按钮用于设置模型编号的字体。

显示单元编号（Show element labels）：该栏用于显示单元编号，其后的“颜色”用于选择字体颜色。

显示面编号（Show face labels）：该栏用于显示面的编号，其后的“颜色”用于选择字体颜色。

显示结点编号（Show node labels）：该栏用于显示结点编号，其后的“颜色”用于选择字体颜色。

显示结点符号（Show node symbols）：该栏用于显示结点标记。选中此选项后，“颜色”、“符号”和“大小”栏被激活，分别用于选择标记的颜色、符号和大小。

允许颜色代码选择集覆盖此对话框中的选项（Allow color codes elections to override options in this dialog）：默认为选择该项，允许色码（Color Code）的选择优先于该对话框的选择。

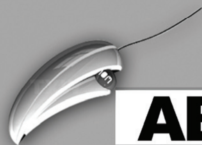
法线（Normals）：该选项卡用于控制法线的显示和设置，如图 9-22 所示。默认为不显示法线，选择“显示法线”（Show normals）项用于显示法线，同时法线的设置选项被激活。

在单元上/在表面上（On elements/On surfaces）：该栏用于选择显示模型中单元/表面的法线。

颜色（Colors）：该栏用于选择“面法线”（Face normal）、“梁切向”（Beam tangent）、“梁的 n1 方向”（Beam n1）和“梁的 n2 方向”（Beam n2）的标记的颜色。

风格（Style）：该栏用于选择表示法线标记的“长度”（Length）、“线粗”（Line thickness）和“箭头”（Arrow head）。

其它（Other）：该选项卡用于设置单元的缩放和模型的透明度，如图 9-23 所示。



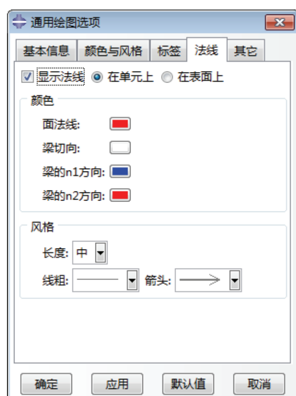


图 9-22 “法线”选项卡

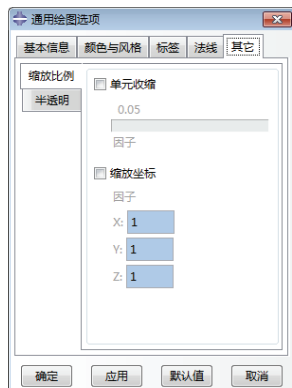


图 9-23 “其它”选项卡

9.1.3 符号变量

在[符号 S ALL_PRINCIPAL]工具中，选择“符号”变量，显示所有主变量的符号。如图 9-24 所示为 INC=01 时的应力符号。如图 9-25 所示为 INC=03 时的应力符号。

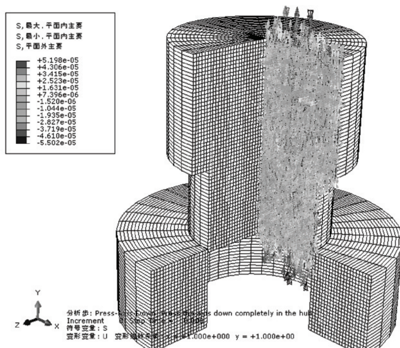


图 9-24 应力符号，INC=01

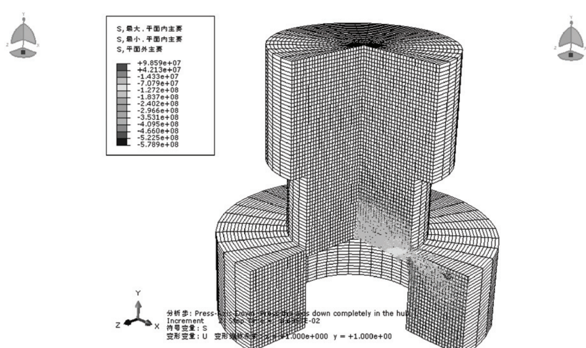


图 9-25 应力符号，INC=03

单击[工具按钮]工具中的[按钮]按钮，继续时间进程，如图 9-26 所示为 INC=06 时的应力符号。图 9-27 所示为 INC=12 时的应力符号。如图 9-28 所示为 INC=16 时的应力符号。图 9-29 所示为 INC=23 时的应力符号。

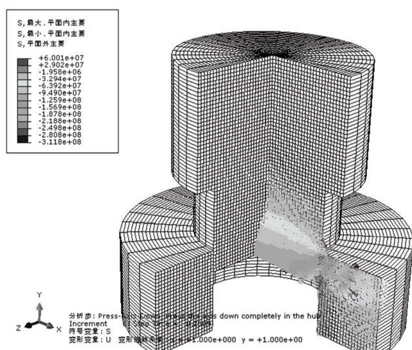


图 9-26 应力符号，INC=06

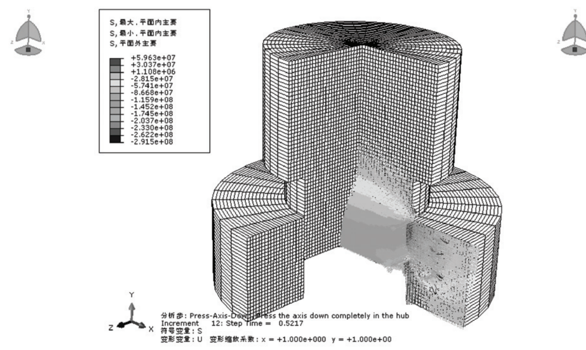


图 9-27 应力符号，INC=12

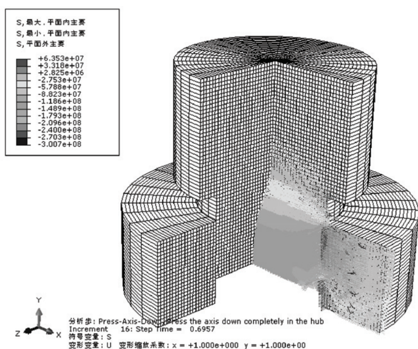


图 9-28　应力符号，INC=16

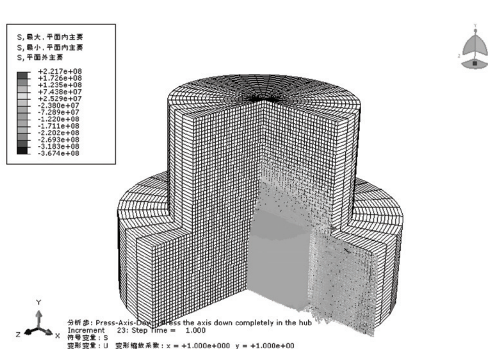


图 9-29　应力符号，INC=23

读者在实际工程中可以以此逐步分析，对时间历程的每一帧均进行详尽的了解。

9.2　图表输出

ABAQUS/CAE 能显示两个变量间的关系图表，并能将其以表格形式输出到文件。单击工具区中的“创建 XY 数据”（Create XY Data）工具，或选择“工具（Tools）→XY 数据（XY Data）→创建（Create）”命令，弹出“创建 XY 数据”（Create XY Data）对话框，如图 9-30 所示。该对话框用于选择数据来源。



图 9-30 “创建 XY 数据”对话框

ODB 历程变量输出（ODB history output）：X-Y 曲线的数据来源于输出数据库的历程变量，得到选择的历程变量与时间的关系图表。

ODB 场变量输出（ODB field output）：X-Y 曲线的数据来源于输出数据库的场变量，得到选择的场变量与时间的关系图表。

厚度（Thickness）：X-Y 曲线的数据来源于与壳单元厚度相关的变量，仅在壳单元划分的区域有效。

自由体（Free Body）：X-Y 曲线的数据来源于当前会话中的自由体。

操作 XY 数据（Operate on XY data）：X-Y 曲线的数据来源于已经保存的 X-Y 曲线的数据，通过指定新的 X-Y 数据与保存的 X-Y 数据的数学关系来得到新的 X-Y 图表。

ASCII 文件（ASCII file）：X-Y 曲线的数据来源于文本文件。该文件至少包含两列数据，用户需要指定 X、Y 轴数据对应的列数及读入数据的间隔行数。

键盘（Keyboard）：X-Y 曲线的数据来源于 ABAQUS/CAE 环境中手工输入的表格。

路径（Path）：用户需要先创建路径，再得到某个场变量沿路径的变化图表。

下面介绍常用的几种 X-Y 图表的创建：历程变量与时间的关系曲线，某个场变量与时间的关系曲线，还有沿路径显示某个变量的变化情况。

9.2.1 历程变量 XY 数据输出

在如图 9-30 所示的“创建 XY 数据”对话框中选择来源为“ODB 历程变量输出”，单击“继续”，弹出图 9-31 所示的“历程输出”对话框。

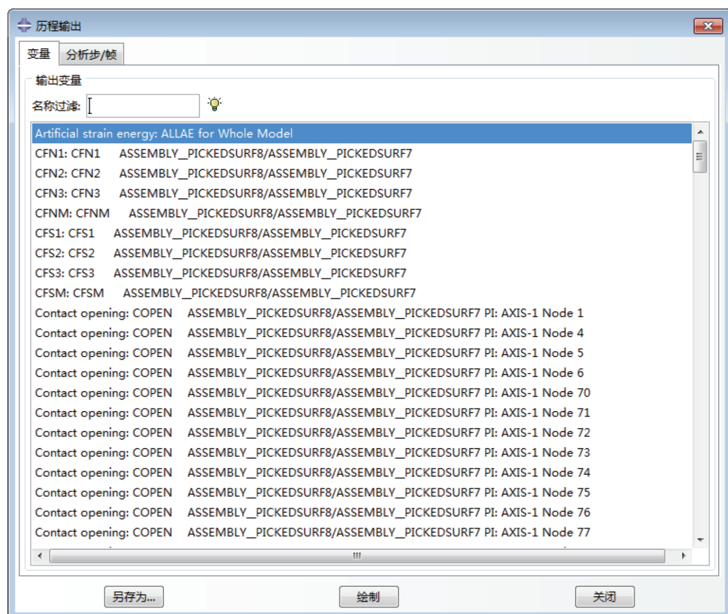


图 9-31 “历程输出”对话框

在“变量”选项卡中可以选择输出的历程变量。例如，按住〈Shift〉键选择如图 9-32 所示的 CPRESS 项目，单击“绘制”，绘制这几个结点的接触压力曲线如图 9-33 所示。

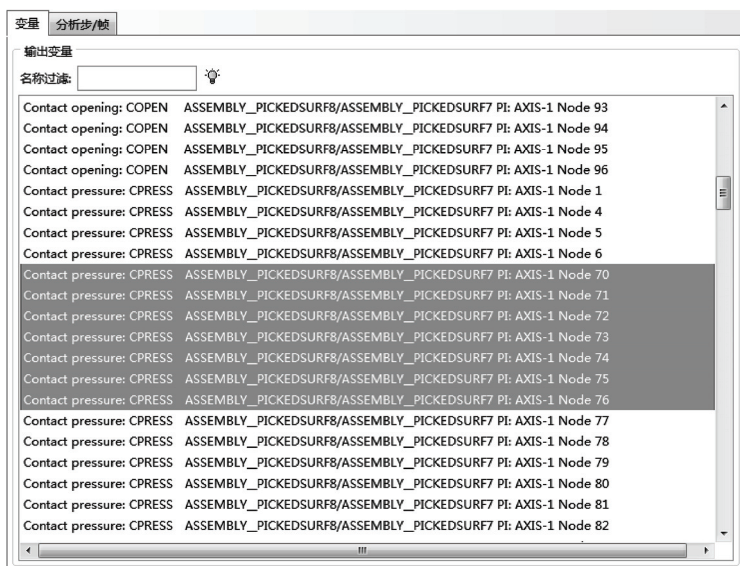


图 9-32 选择绘制项目

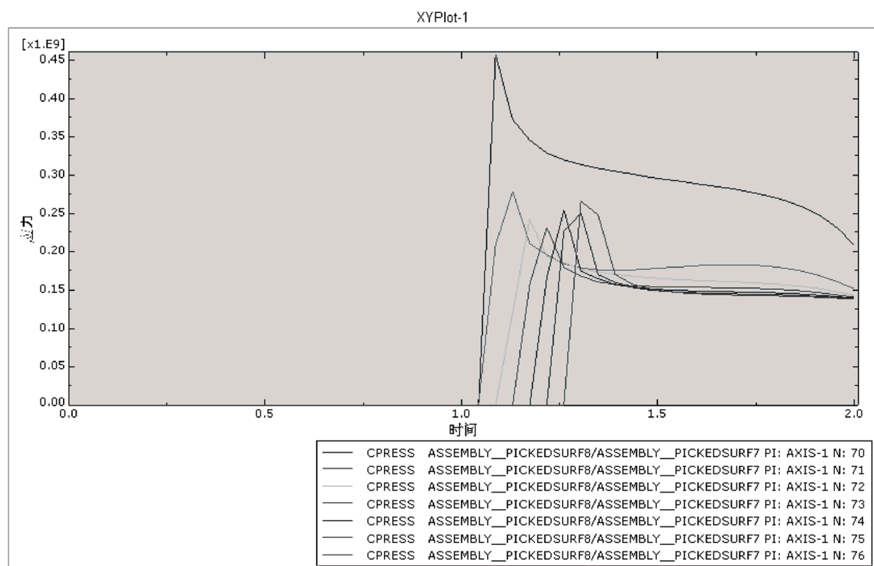


图 9-33　接触压力曲线

9.2.2 场变量 XY 数据输出

在如图 9-30 所示的“创建 XY 数据”对话框中选择来源为“ODB 场变量输出”，单击“继续”，弹出图 9-34 所示的“来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框。

激活的分析步/帧（Active Steps/Frames）：该按钮用于选择图表中时间轴（X 轴）的坐标范围。单击该按钮，在弹出的“激活的分析步/帧”（Active Steps/Frames）对话框中激活或抑制分析步和增量步。

变量（Variables）：该选项卡用于选择位于图表 Y 轴的场变量。

位置（Position）：用于选择场变量的位置，默认为“积分点”（Integration Point）。

变量（Variables）列表：该列表显示出保存在输出数据库中的场变量，并随着位置（Position）的选择而自动更新，用于场变量的选择。

编辑（Edit）：用户在该栏内输入场变量的名称，按〈Enter〉键选中该变量。

单元/结点（Elements/Nodes）：该选项卡用于选择单元/结点。如图 9-35 所示。

方法（Method）：该列表用于选择单元/结点的选取方式。

从视口中拾取（Pick from viewport）：在视图区内选取一个或多个单元/结点，右侧的表格内列出已选取的单元/结点。

编辑选择集（Edit Selection）：编辑已选取的单元/结点。

添加选择集（Add Selection）：添加单元/结点。

删除选择集（Delete Selection）：删除已选取的单元/结点。

单元/结点标签（Element/Node labels）：指定单元/结点的标号。在右侧表格内的 Part instance 列选择部件实体，在其后的“标签”（Labels）栏内输入用于 XY 图表的单元/结点的标号，用逗号或冒号隔开。“添加行”（Add Row）和“删除行”（Delete Row）按钮分别用于添加和删除行。

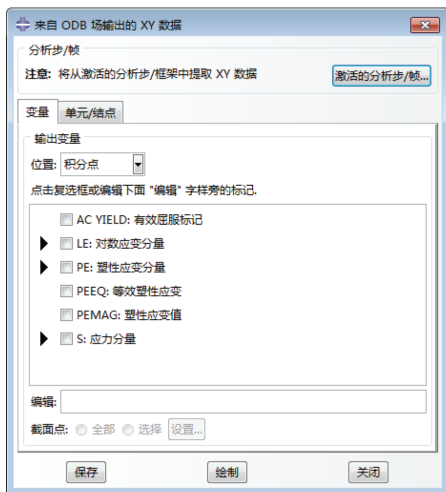


图 9-34 “来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框

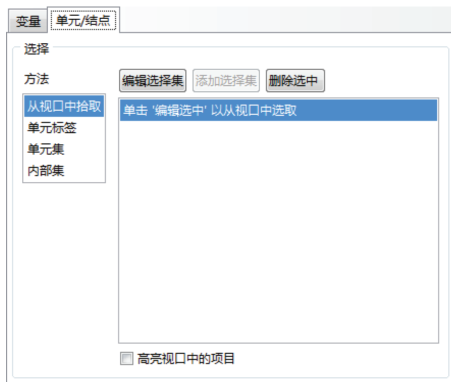


图 9-35 “单元/结点”选项卡

单元/结点集（Element/Node sets）：选取集合内包含的单元/结点。右侧表格内列出了单元/结点集合，若模型包含较多的集合，用户可以通过“名称过滤”（Name filter）栏进行集合名称的过滤。

内部集（Internal sets）：选取 ABAQUS/CAE 产生的内部集合中的单元/结点。用户仍然可以通过“名称过滤”（Name filter）栏进行内部集合名称的过滤。

单击▦弹出如图 9-36 所示的“XY 数据管理器”，绘制对数应变曲线如图 9-37 所示。如图 9-38 所示为平面内对数应变曲线。图 9-39 所示为主应变曲线。如图 9-40 所示为应力曲线。图 9-41 所示为应力分量的曲线。图 9-42 所示为应力不变量的曲线。

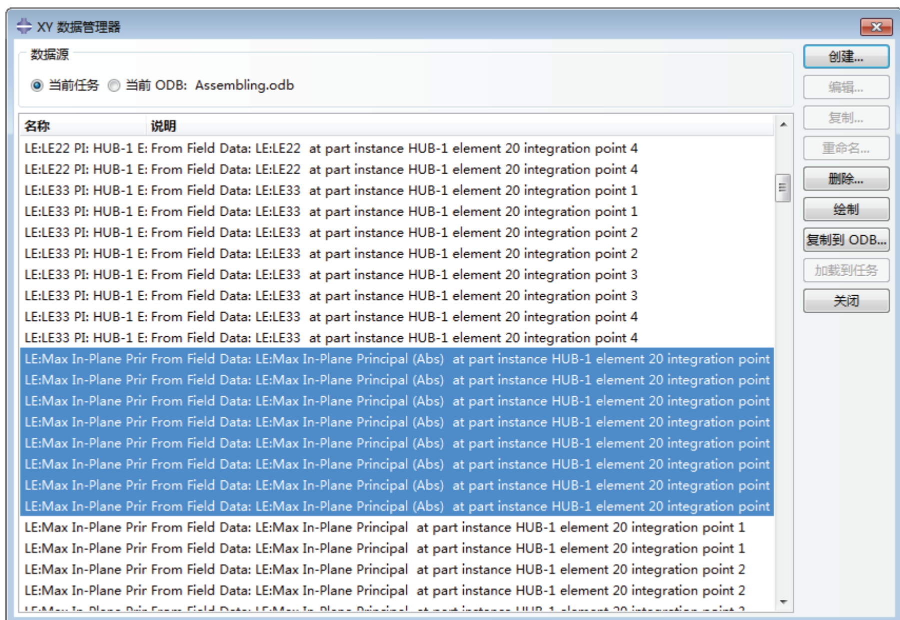


图 9-36 “XY 数据管理器”对话框

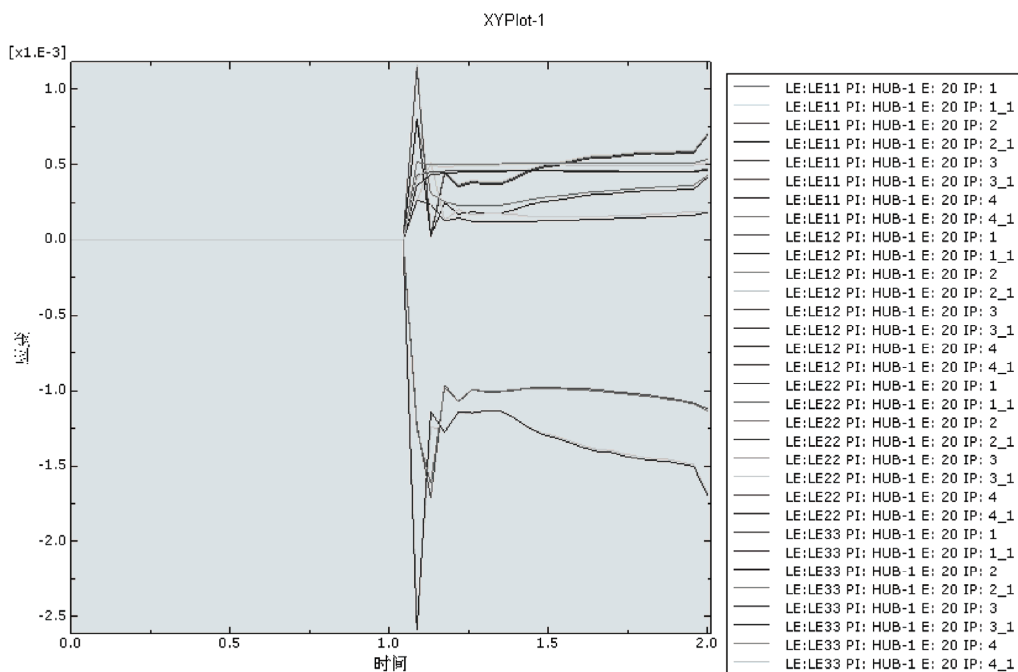


图 9-37　对数应变曲线

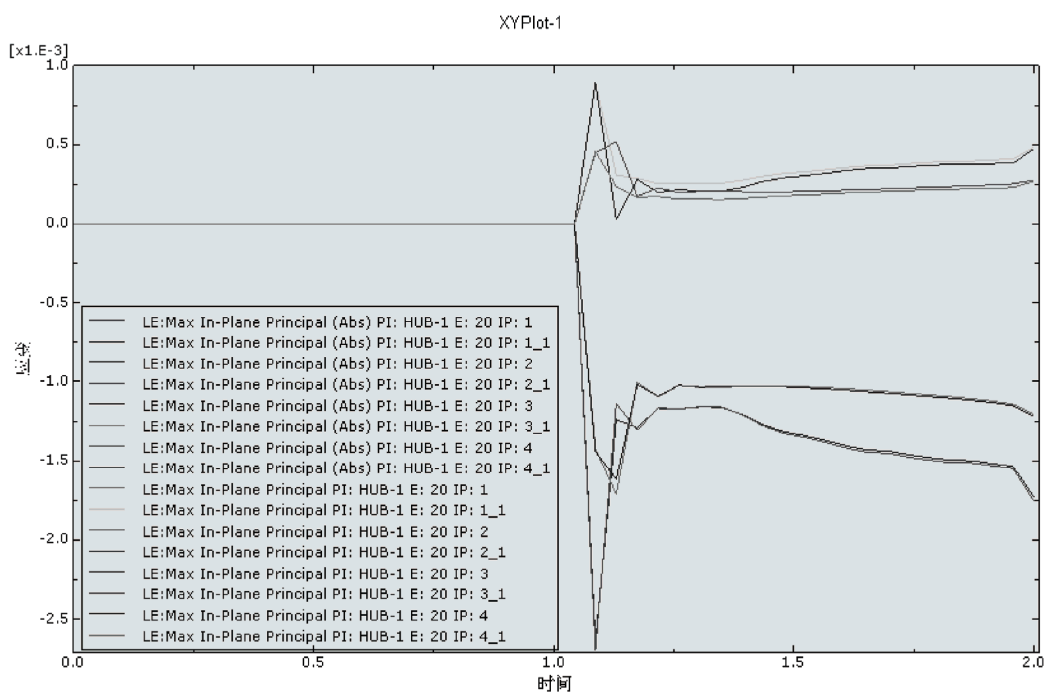


图 9-38　平面内对数应变曲线

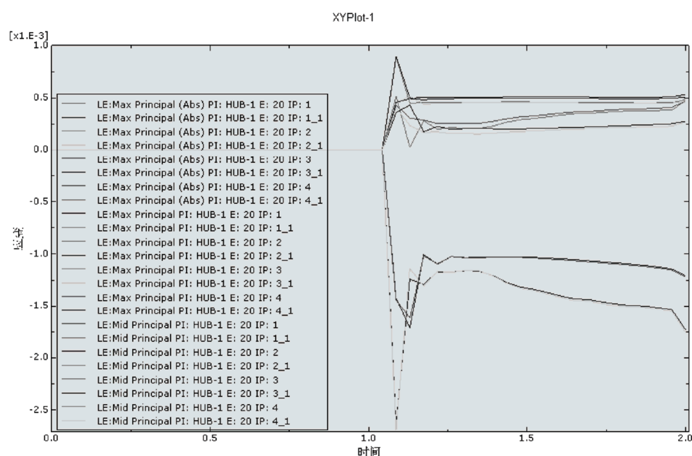


图 9-39　主应变曲线

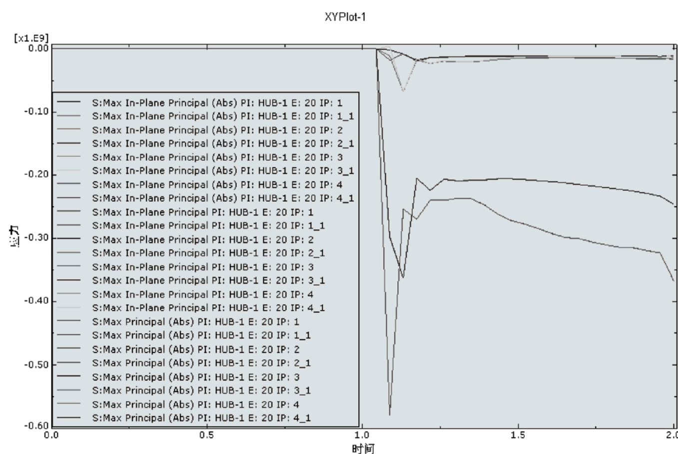


图 9-40　应力曲线

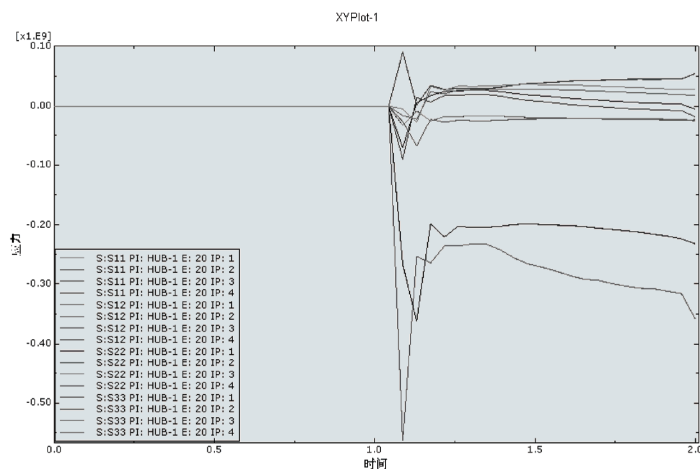


图 9-41　应力分量曲线

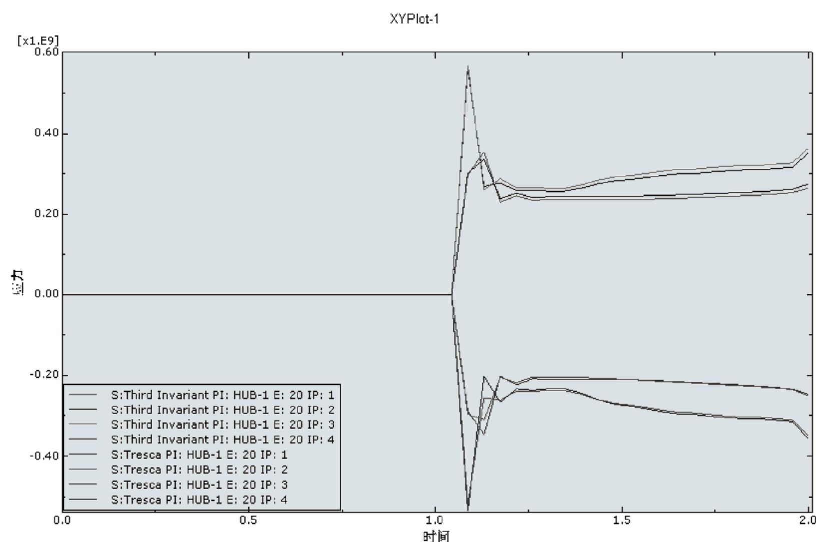


图 9-42　应力不变量曲线

9.2.3 关于路径的 XY 变量输出

在如图 9-30 所示的“创建 XY 数据”对话框中选择来源为“路径”，弹出图 9-43 所示的“来自路径的 XY 数据”对话框。

选择“工具→路径→管理器”命令，在图 9-44 所示的“路径管理器”对话框中，可以对路径进行创建与管理。单击“创建”按钮，弹出图 9-45 所示的“创建路径”对话框，选择“结点列表”，单击“继续”，弹出图 9-46 所示的“编辑结点列表路径”对话框。



图 9-43 “来自路径的 XY 数据”对话框



图 9-44 “路径管理器”对话框

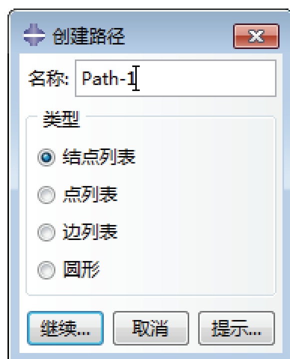


图 9-45 “创建路径”对话框



图 9-46 “编辑结点列表路径”对话框

在图 9-46 所示的“编辑结点列表路径”对话框中的“部件实例”中选择“HUB-1”，在“结点编号”中输入“21:525:21”，即使用 21 号结点～525 号结点，间隔 21 个编号调用，单击“确定”完成设置。创建的路径如图 9-47 所示。

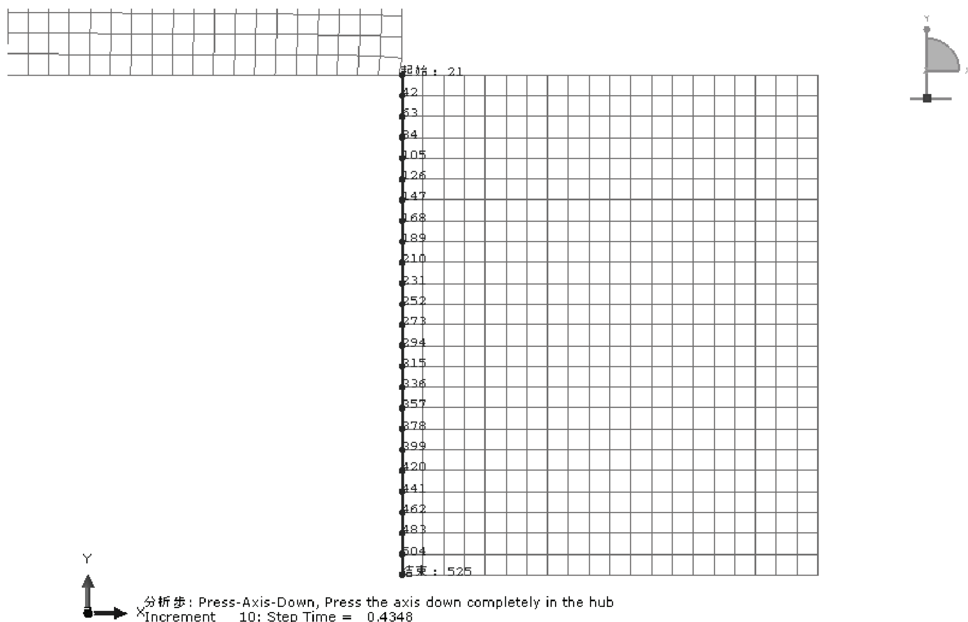


图 9-47 路径

此时，如图 9-48 所示，在“路径”中已显示可用的路径。在图 9-43 所示的“来自路径的 XY 数据”对话框中可创建一系列关于路径的应力曲线，单击“另存为”保存，在 XY 数据管理器中绘制关于路径的应力曲线如图 9-49 所示。



图 9-48 可用路径

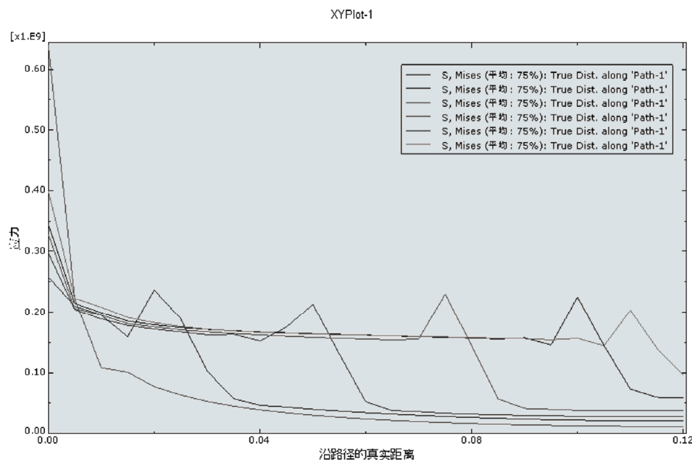


图 9-49 关于路径的应力曲线

9.3 制作动画

ABAQUS/CAE 的“可视化”模块能够提供变形图、云图、矢量/张量符号图及材料方向图的动画显示，可通过“动画”(Animate)菜单或工具区内的工具（见图 9-50）实现。

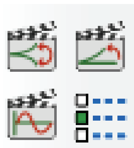


图 9-50 动画工具

- “动画→时间历程”(Animate→Time History)工具：以增量步的顺序显示整个分析过程的变形图、云图、矢量/张量符号图或材料方向图的动画。如果云图或矢量/张量符号图显示在变形前的模型上，则视图区仅显示场变量的变化过程。另外，时间历程动画也适用于与时间相关的 XY 图表。选择该功能也可以通过选择“动画(Animate)→时间历程(Time History)”命令实现。
- “动画→缩放因子”(Animate→Scale Factor)工具：按顺序显示从分析开始到选择的增量步为止的变形动画，适用于变形图及显示在变形后模型上的云图或矢量/张量符号图（对于显示在变形后模型上的云图或矢量/张量符号图，同时显示变形和场变量）。该功能也可以通过选择“动画(Animate)→缩放因子(Scale Factor)”命令实现。
- “动画→谐振”(Animate→Harmonic)工具：显示从分析开始到选择的增量步为止的真实变形及与其对称的模拟变形的简谐动画，适用于变形图及显示在变形后模型上的云图或矢量/张量符号图（对于显示在变形后模型上的云图或矢量/张量符号图，

同时显示变形和场变量)。这种动画适用于特征值分析中振形的计算。该功能也可以通过选择“动画(Animate)→谐振(Harmonic)”命令实现。

先选择合适的模型显示(如变形图、云图),再单击以上介绍的动画工具,视图区显示相应的动画,再次单击该工具即可停止动画,视图区重新出现之前选择的模型显示。

环境栏右方的工具箱可以用来控制动画的显示,如图 9-51 所示。从左起第 1 个工具用于播放和暂停的控制;第 2～5 个工具用于选择动画中的图像,选择了图像后,动画暂停。单击“帧选择器”(Frame Selector)工具,在弹出的“帧选择器”(Frame Selector)对话框中选择图像,此时动画暂停。



图 9-51　动画控制工具

工具箱中的后两个工具用于选择观察点(在变形动画显示中不动的点)。

单击“设定观察点随一个点移动”(Set View Camera to Move with a Node)工具,在视图区选择一个结点作为观察点,则动画在显示模型的变形过程中该结点保持不动。

若用户想恢复初始的动画显示,单击“将观察点设定到全局坐标”(Set View Camera to the Global CSYS)工具。

若用户使用“设定观察点随一个点移动”工具在视图区选取了一个结点作为观察点,则使用“旋转视图”(Rotate View)工具时模型以该结点为旋转中心。

单击工具区中动画显示工具栏内的“动画选项”(Animation Options)工具,或选择“选项(Options)→动画(Animation)”命令,弹出“动画选项”对话框,如图 9-52 所示。该对话框包含 5 个选项卡。

“播放器”(Player)选项卡用于设置动画的播放选项,如图 9-52 所示。

模式(Mode):该栏用于设置动画的播放模式。

播放一次(Play once):按第一个画面到最后一个画面的顺序播放一次动画。

循环(Loop):此为默认选项,按第一个画面到最后一个画面的顺序循环播放,显示完最后一个画面后跳到第一个画面。

向后循环(Loop backward):按最后一个画面到第一个画面的顺序反向循环播放,显示完第一个画面后跳到最后一个画面。

摇摆(Swing):先按第一个画面到最后一个画面的顺序播放,再按最后一个画面到第一个画面的顺序播放,并重复播放此动画。

帧频率(Frame Rate):拖动滑动条控制动画播放的速度,默认为最快的速度(Fast)。

显示帧计数(Show frame counter):用于选择是否在视图区右上角显示画面计数器,默认为选择该选项。若选择播放“时间历程”(Time History)动画,则状态区也会显示增量步和分析步时间的变化情况。

“缩放系数/谐波”(Scale Factor/Harmonic)选项卡用于设置缩放系数(Scale Factor)和谐振(Harmonic)动画的参数,如图 9-53 所示。

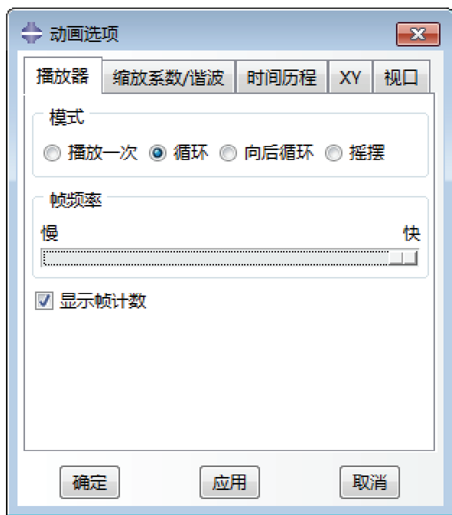


图 9-52 “动画选项”对话框（“播放器”选项卡）

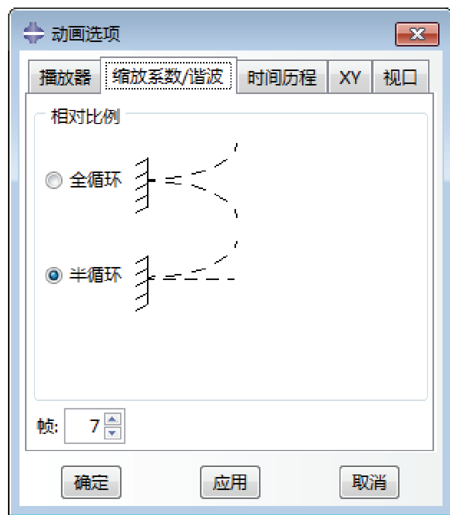


图 9-53 “缩放因数/谐波”选项卡

相对比例（Relative Scaling）：该栏用于选择变形范围。

全循环（Full cycle）：对于缩放系数（Scale Factor）动画，产生反向变形，即比例系数的变化范围为-1～1；对于谐振（Harmonic）动画，产生全周期的简谐振动（0～360°）。

半循环（Half cycle）：对于缩放系数动画，仅产生真实变形，即比例系数的变化范围为0～1；对于谐振动画，产生半周期的简谐振动（0～180°）。

帧（Frames）：该栏用于选择动画中的图像数量，默认值为“7”。

时间历程（Time History）选项卡用于设置时间历程（Time History）动画的播放参数，如图 9-54 所示。

基于帧（Frame-based）：此为默认选项，基于增量步显示动画，画面数为增量步的数量。

基于时间（Time-based）：基于时间显示动画。

时间选择：当选择基于时间时被激活。

时间增量（Time increment）：该栏用于设置动画的时间增量，默认为整个分析的时间，即动画仅包含分析开始时和分析结束时的两个画面。

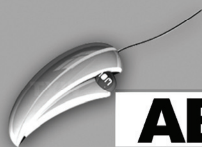
最小时间（Mintime）：该栏用于设置动画的起始时间。默认为“自动计算”（Auto-compute），即分析开始的时间；用户可以在“指定”（Specify）栏内进行设置。

最大时间（Maxtime）：该栏用于设置动画的结束时间。默认为“自动计算”，即分析结束的时间；用户可以在“指定”栏内进行设置。

“XY”选项卡用于设置与时间相关的 XY 图表动画的播放参数，如图 9-55 所示。

当显示 XY 图表的动画时，ABAQUS/CAE 产生一条垂直于 X 轴的直线，并沿 X 轴从左到右移动（基于增量步），在该直线与 XY 曲线的相交处出现一个符号。

采用高亮方法绘制（Draw using highlight method）：该选项用于高亮度显示直线和符号，默认为选择该项。



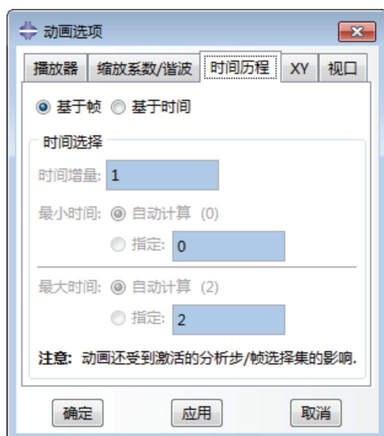


图 9-54 “时间历程”选项卡

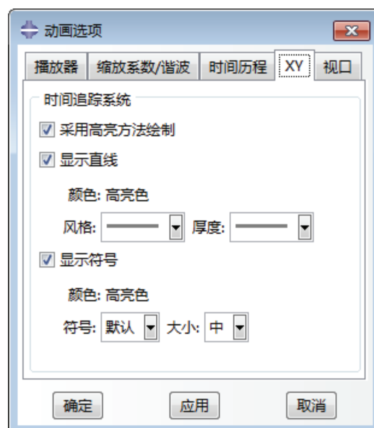


图 9-55 XY 选项卡

显示直线（Show line）：该选项用于显示垂直于 X 轴的直线，默认为选择该项，此时用户需要设置直线的颜色、线型和粗细。

颜色（Color）：用于选择直线的颜色，在不选择“采用高亮方法绘制”项时被激活。

风格（Style）：用于选择直线的线型。

厚度（Thickness）：用于选择直线的粗细。

显示符号（Show symbol）：该选项用于显示直线与 XY 曲线相交处的符号，默认为选择该项，此时用户需要设置符号的颜色、形状和大小。

颜色（Color）：用于选择符号的颜色，在不选择“采用高亮方法绘制”项时被激活，默认为 ABAQUS/CAE 自动选择各符号的颜色。

符号（Symbol）：用于选择符号的形状，默认 ABAQUS/CAE 自动选择各符号的形状。

大小（Size）：用于选择符号的大小。

“视口”（Viewports）选项卡用于设置动画显示的视口，如图 9-56 所示。

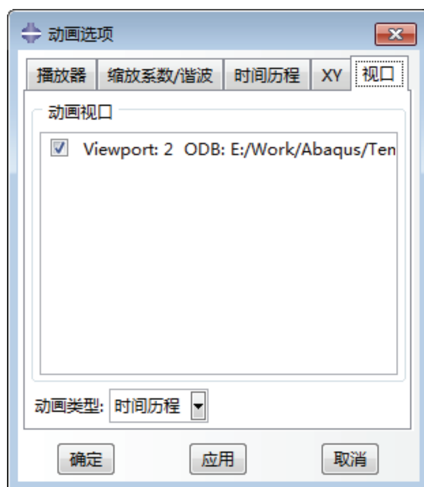


图 9-56 “视口”选项卡

动画视口（Animated Viewports）：该列表用于选择显示动画的视口。

动画类型（Animation type）：该栏用于选择动画的类型。

设置完成后，单击“确定”按钮。

在播放动画的状态下，用户可以将动画以文件形式保存下来。具体方法为：选择“动画（Animate）→另存为（Save As）”命令，在弹出的“保存动画”（Save Image Animation）对话框中进行相关的设置后保存动画。在用外部播放器播放保存的文件时，如果发现画面静止，原因是在保存文件的时候，没有处在动画正在播放的状态下，更正即可。

其他后处理功能，请参阅系统帮助文件的相关章节。

9.4 本章小结

本章为读者介绍了 ABAQUS 的后处理功能——“可视化”模块。

在本模块中可以进行结果的显示，可以在不同的时间点显示云图、变形图及符号变量等，并且可以进行图表数据输出。

在“可视化”模块中可以自定义关于历程变量、场变量、关于路径的变量输出。

在模块中可以将分析对象的应力、应变、位移、速度、加速度、接触力、接触应力、温度及电磁特性等多种物理量的各个分量作为结果显示在模型上。

符号变量可以以矢量符号的形式显示应力、应变、位移、速度、加速度、接触力、接触应力、温度及电磁特性等多种物理量的总量与各分量的大小及方向。

图表数据可以绘制各物理量关于时间历程的曲线，也可以绘制其关于空间位置的曲线。

ABAQUS 可以以不同的变化速率展现模型各个物理量的变化过程，并制作精致的动画。

第 10 章　线性静态分析

线性静力分析是计算结构在不变载荷作用下的响应，是 ABAQUS 有限元分析的基础。固定不变的载荷与响应是指假定载荷和结构的响应随时间变化非常微小或缓慢。结构静力学分析不考虑惯性和阻尼的影响。

静力分析也可以是非线性的。本章从线性分析入手，为读者介绍相关实例，循序渐进地走向高级分析。关于非线性问题的分析，是 ABAQUS 重要的应用领域，将有专门章节进行讨论。

本章学习目标

- 掌握线性静力学分析基本概念
- 了解进行静力学分析的基本知识
- 掌握进行静力学分析的方法
- 初步掌握 INP 文件的编写方法

10.1　线性静力学分析概述

结构分析是有限元分析方法中最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构如桥梁和建筑物，汽车结构如车身骨架，海洋结构如船舶结构，航空结构如飞机机身，还包括机械零部件如活塞、传动轴等。简单来说，例如在一台机械设备中：可以发生相对运动的称为机构，不能发生相对运动的称为结构。线性静力学分析，就是要解决线性的结构的静力学问题。

10.1.1 静力学分析的基本概念

静力分析是计算在固定不变载荷作用下结构的响应，它不考虑惯性和阻尼影响。可是，静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷）的作用。

静力分析用于计算由不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定，即假定载荷和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括：外部施加的作用力和压力、稳态的惯性力（如重力和离心力）、强迫位移、温度载荷（对于温度应变）及能流（对于核能膨胀）等。

10.1.2 结构静力学分析的方法

线性静力学问题是简单且常见的有限元分析类型，不涉及任何非线性分析（材料非线性、几何非线性及接触等），也不考虑惯性及与时间相关的材料属性。在 ABAQUS 中，该类问题通常采用静态通用（Static，General）分析步或静态线性摄动（Static， Linear

perturbation）分析步进行分析。

线性静力学问题很容易求解，因此用户往往更关心的是计算精度和求解效率：希望在获得较高精度的前提下尽量缩短计算时间，特别是大型模型。计算精度和求解效率的高低主要取决于网格的划分，包括种子的设置、网格控制和单元类型的选取。应尽量选用精度和效率都较高的二次四边形/六面体单元，在主要的分析部位设置较密的种子；若主要分析部位的网格没有大的扭曲，使用非协调单元（如 CPS4I、C3D8I）效果较好。对于复杂模型，可以采用分割模型的方法划分二次四边形/六面体单元；有时分割过程过于繁琐，用户可以采用精度较高的二次三角形/四面体单元进行网格划分。

10.2 线性静力学分析—滑动轴承

本章以轴承座为例介绍线性静力学分析的全过程，并向读者展示显示体约束的操作。其中一些步骤（如建模、装配和网格划分）与其他分析类型基本相同，这些内容在后续各章中不再重点叙述。

10.2.1 问题描述

本节详细讲解一个固定的轴承座（如图 10-1 与图 10-2 所示）的静力学分析实例。本实例采用国际单位制：长度（毫米，mm）、力（牛顿，N）、应力（兆帕，MPa）。该轴承座通过 4 个安装孔进行固定，轴承孔的下半部分承受由轴传来的径向压力载荷（50MPa），轴承孔圆周上承受推力载荷（10MPa）。轴瓦和轴设置为显示体约束，跟随轴承孔壁上三点定义的坐标系运动。本例选用静态通用（Static，General）分析步，分析轴承座的应力和位移状态。

Φ60
轴瓦
轴
轴承座
35
Φ16
Φ40
20

图 10-1 模型尺寸

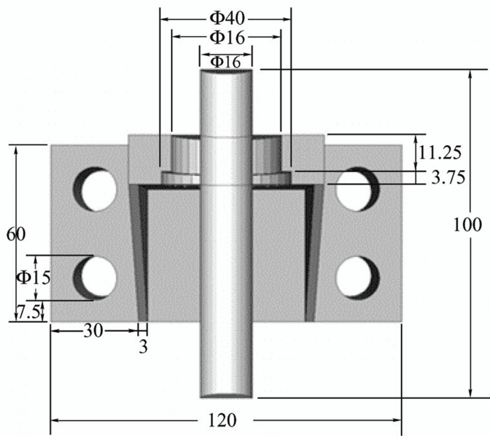


图 10-2 模型尺寸

10.2.2 分析过程

首先，打开 ABAQUS/CAE 的启动界面，单击“选择”（Create Model Data base）按钮创建一个 ABAQUS/CAE 的模型数据库，随即进入“部件”功能模块。然后，在该模块中创建轴承座、轴瓦和轴的实体模型。

■ 建立模型

（1）单击工具区中的（创建部件，Create Part）工具，弹出“创建部件”对话框，单击“继续”（Continue）按钮，进入草图绘制界面。

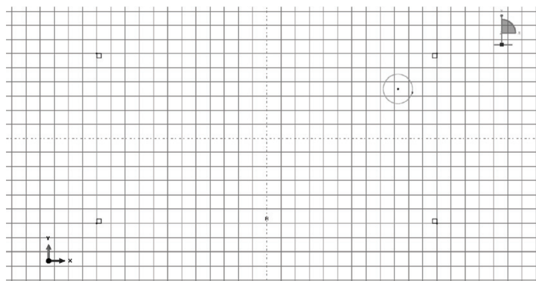
（2）单击工具区中的“创建矩形”（Create Lines→Rectangle）工具，在提示区输入“-60，30”，按〈Enter〉键；在提示区继续输入“60，-30”，按〈Enter〉键，完成矩形的草图绘制操作。

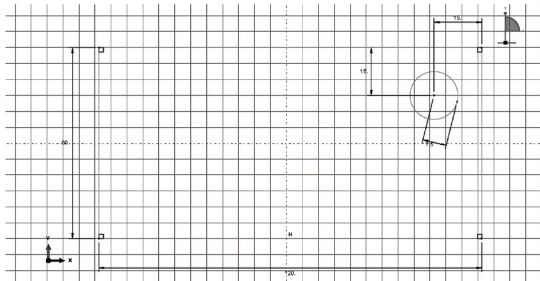
（3）单击工具区中的“创建圆”（Create Circle）工具，在提示区输入“0”，按〈Enter〉键；在提示区继续输入“7.5”，按〈Enter〉键，完成矩形和一个圆的草图绘制操作，如图 10-3 所示。

（4）单击工具区中的“添加约束”（Add Constraint）工具，在弹出的对话框中选择“固定”（Fixed），在视图区选择矩形的任意一条边（本例选择左边），矩形左边被约束，关闭该对话框，结果如图 10-4 所示。

（5）单击工具区中的“添加尺寸”（Add Dimension）工具，在视图区选择圆心，再选择矩形的右边，弹出“尺寸标注”，拖曳鼠标控制尺寸标注的位置，在合适的位置单击鼠标左键，在提示区输入新的距离值“15”，按〈Enter〉键。

（6）继续选择圆心，再选择矩形的上边，将尺寸标注拖曳到合适位置后单击鼠标左键，在提示区输入“15”，按〈Enter〉键，完成一个圆的定位。由于之前约束了矩形左边，在圆的移动过程中矩形固定不动。


图 10-3　草图


图 10-4　完成约束

（7）单击工具区中的（线性阵列，Linear Pattern）工具，在视图区选择圆，单击鼠标中键，弹出“线性阵列”对话框，如图 10-5 所示。

将“方向 1”（Direction1）栏的“个数”（Number）设置为“2”，“间距”（Spacing）设置为“90”，单击（翻转，Flip）按钮；将“方向 2”（Direction2）栏的“间距”（Spacing）设置为“30”，单击（翻转，Flip）按钮，单击“确定”按钮，完成基座草图的绘制，如图 10-6 所示。

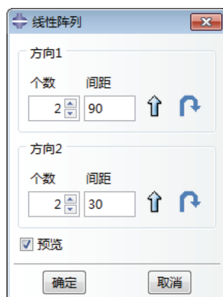
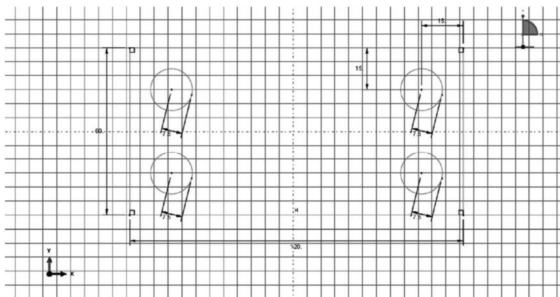


图 10-5　线性阵列


图 10-6　完成绘制草图

（8）单击鼠标中键，弹出图 10-7 所示的“编辑基本拉伸”（Edit Base Extrusion）对话框，单击“确定”按钮，视图区显示轴承基座的模型，如图 10-8 所示。

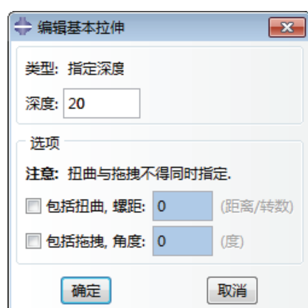


图 10-7 编辑基本拉伸

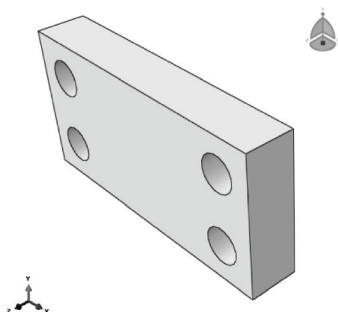


图 10-8 基座

（9）单击工具箱中的（创建拉伸实体 Create Solid→Extrude）工具，在视图区选择基座顶面，再选择右边线，如图 10-9 所示，进入绘制草图界面。

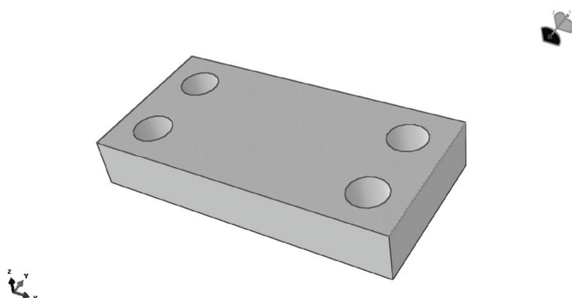


图 10-9 草图平面与参考边

（10）单击工具箱中的（创建拉伸实体，Create Solid→Extrude）工具，在提示区输入“-30，30”，按〈Enter〉键；在提示区继续输入“30，15”，按〈Enter〉键，完成矩形的草图绘制操作，如图 10-10 所示。

连续单击两次鼠标中键，弹出“编辑拉伸”（Edit Extrusion）对话框，在“深度”（Depth）栏内输入“35”，单击“确定”按钮，完成轴瓦支架下部模型的构建，如图 10-11 所示。

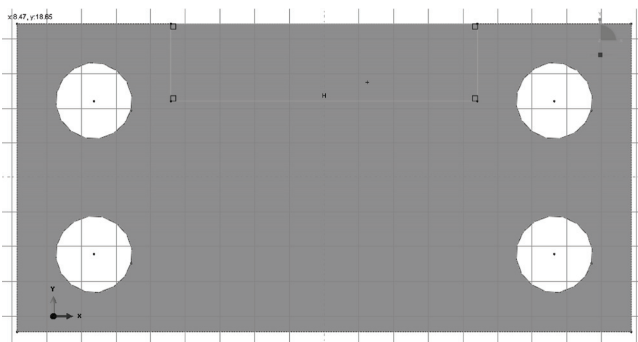


图 10-10 绘制草图

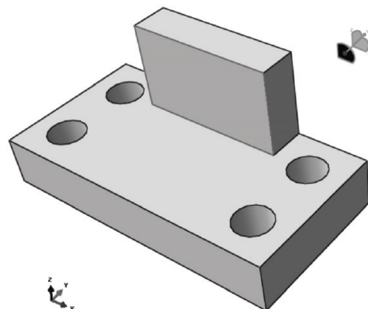


图 10-11 支架

（11）再次单击工具箱中的（创建拉伸实体，Create Solid→Extrude），在视图区选择支架前部的面，如图 10-12 所示，再选择其上端边线，进入绘制草图界面。

单击工具箱中的，鼠标指向右边线的上端点，视图区左上角显示出该点的坐标“17.5，30”，用同样的方法得到右边线下端点的坐标“17.5，-30”。

此时，在提示区输入圆心的坐标“17.5，0”，按〈Enter〉键；选择右边线的上端点，鼠标从该线右侧逐渐移动到下端点，单击鼠标选择该端点，完成半圆草图的绘制，如图 10-13 所示。

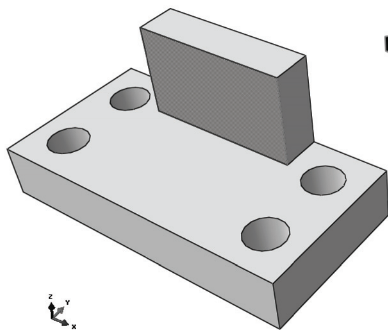


图 10-12　选择草图平面

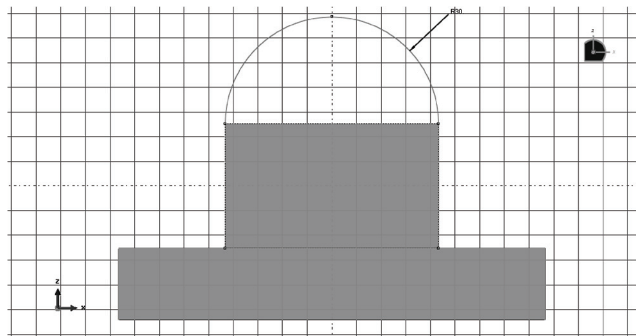


图 10-13　绘制圆弧

（12）单击工具箱中的，选择支架的上边缘，连续单击三次鼠标中键，弹出“编辑拉伸”（Edit Extrusion）对话框，在“深度”（Depth）栏内输入“15”，单击（翻转，Flip）按钮，单击“确定”按钮，完成轴瓦支架上部模型的构建，如图 10-14 所示。

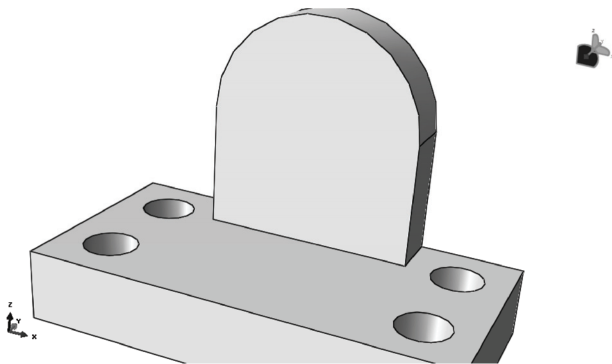


图 10-14　完成支架

（13）再次单击工具箱中的（创建拉伸实体，Create Solid→Extrude）工具，在视图区选择支架右侧的面，再选择其右侧边线，进入绘制草图界面。

单击工具箱中的工具，在视图区先后选择左边线的上、下端点，然后在提示区输入“-52.5，-17.5”，按〈Enter〉键，完成草图，如图 10-15 所示。

再在视图区选择左边线的上端点，连续单击两次鼠标中键，弹出“编辑拉伸”（Edit Extrusion）对话框，在“深度”（Depth）栏内输入“3”，单击（翻转，Flip）按钮，单击“确定”按钮，完成轴瓦支架右侧支撑模型的构建，如图 10-16 所示。

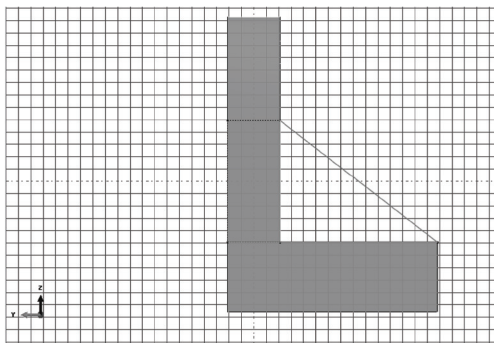


图 10-15　支撑草图

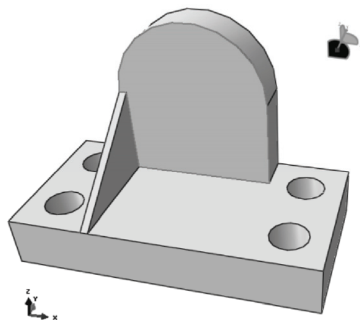


图 10-16　左侧支撑

（14）用同样的方法构建轴瓦支架左侧的支撑模型，如图 10-17 所示。

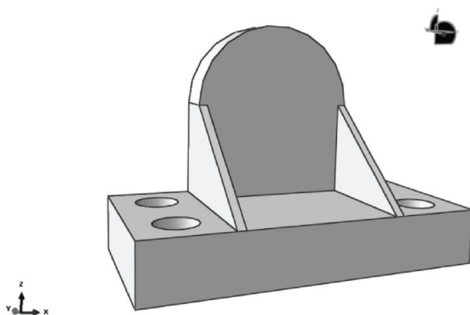


图 10-17　完成支撑

（15）单击工具箱中的（创建切削实体，Create Solid→Extrude）工具，选择支架前面为草图平面，选择支架右边线如图 10-18 所示，进入草图界面。

在草图平面绘制图 10-19 所示的草图，单击中键，弹出“编辑切削”对话框。

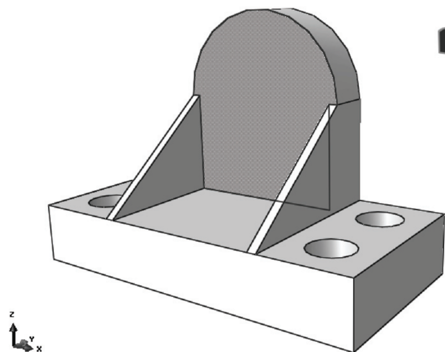


图 10-18　草图平面

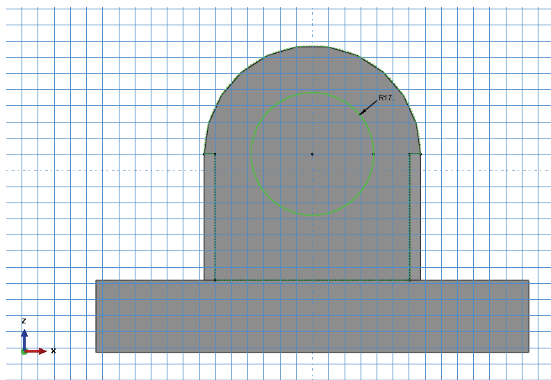


图 10-19　绘制草图

单击“编辑切削”对话框中的“确定”按钮，完成切削如图 10-20 所示。

采用同样的办法，在同一位置切削一个直径为 40 的孔，深度为 3.75，如图 10-21 所示。

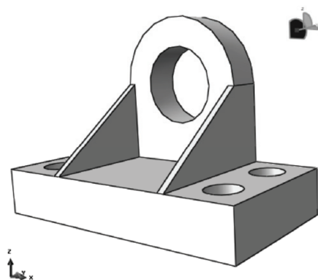


图 10-20　完成切削

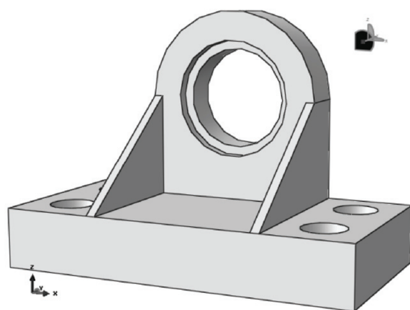


图 10-21　完成切削轴孔

（16）接下来建立轴瓦。单击工具区中的（创建部件，Create Part）工具，弹出图 10-22 所示的“创建部件”对话框，选择“旋转”，单击“继续”（Continue）按钮，进入草图绘制界面。

（17）绘制如图 10-23 所示的草图，单击中键，弹出图 10-24 所示的“编辑旋转”对话框，输入角度为“360”，单击“确定”完成旋转如图 10-25 所示。



图 10-22 “创建部件”对话框

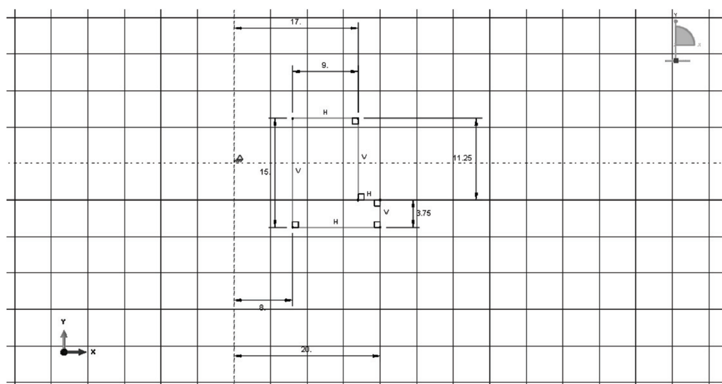


图 10-23　草图



图 10-24 “编辑旋转”对话框

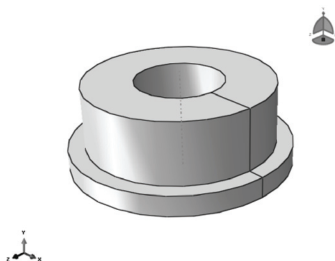


图 10-25　轴瓦

（18）下面创建轴。单击工具区中的（创建部件，Create Part）工具，弹出图 10-26 所示的“创建部件”（Create Part）对话框，选择“旋转”，单击“继续”（Continue）按钮，进入草图绘制界面。



图 10-26 “创建部件”对话框

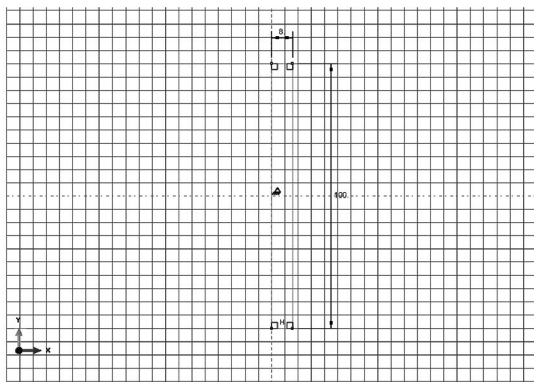


图 10-27 草图

（19）绘制如图 10-27 所示的草图，单击中键，弹出图 10-28 所示的“编辑旋转”对话框，输入角度为“360”，单击“确定”完成旋转，如图 10-29 所示。

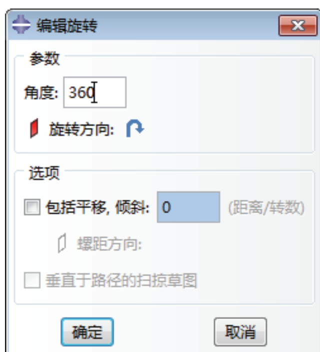


图 10-28 “编辑旋转”对话框



图 10-29 轴瓦

■ 属性设置

（1）单击按钮，新建一个材料，定义为“Steel”，如图 10-30 所示。选择材料行为中的“弹性”，如图 10-31 所示。

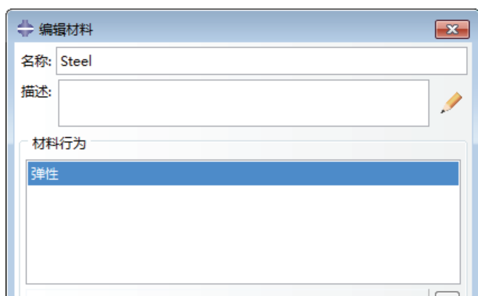


图 10-30 “编辑材料”对话框

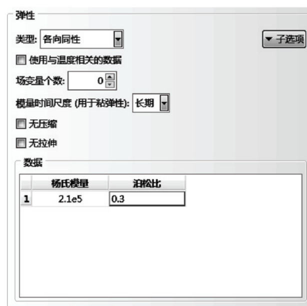


图 10-31 “弹性”对话框

（2）单击按钮，弹出图 10-32 所示的“创建截面”对话框。输入截面名称后，单击“继续”，弹出图 10-33 所示的“编辑截面”对话框。

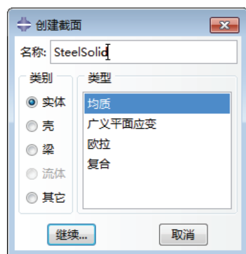


图 10-32 “创建截面”对话框

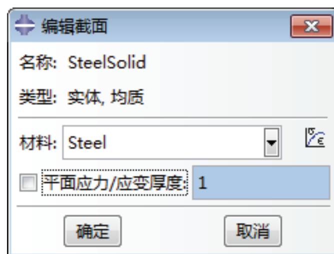


图 10-33 “编辑截面”对话框

（3）在图 10-33 所示的“编辑截面”对话框中选择所包含的材料类型，单击“确定”完成截面的定义。

（4）完成截面定义后，单击按钮，为模型指派截面。单击按钮后，在视图区中拾取要指派的对象，完成拾取后，单击中键，弹出图 10-34 所示的“编辑截面指派”对话框。

单击“确定”完成截面指派，以轴承座为例，部件应变为图 10-35 所示状态。

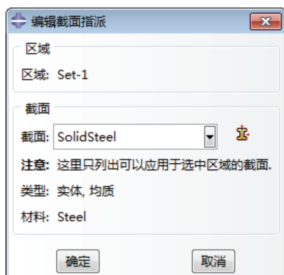


图 10-34 “编辑截面指派”对话框

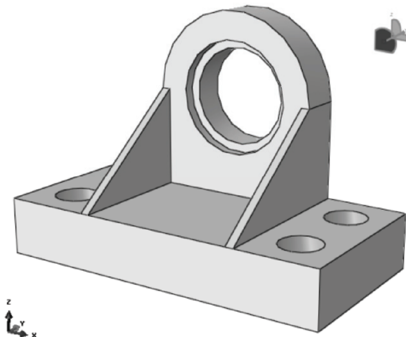


图 10-35 完成轴承座截面指派

参考上述介绍，完成轴瓦的截面指派如图 10-36 所示，完成轴的截面指派如图 10-37 所示。

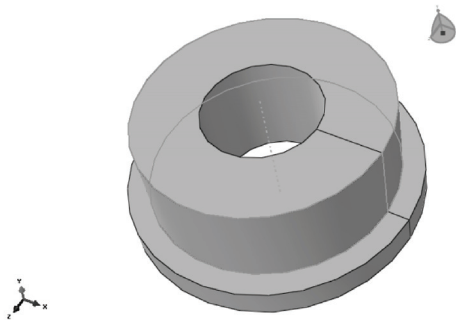


图 10-36 完成轴瓦的截面指派

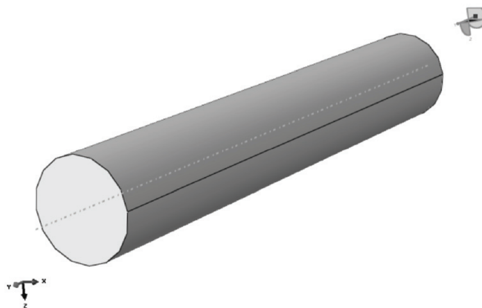


图 10-37 完成轴的截面指派

■ 装配

（1）进入装配模块后，单击按钮，弹出图 10-38 所示的“创建实例”对话框，选择“Base”，选择“非独立（网格在部件上）”，单击“确定”，完成轴承座的实例化，如图 10-39 所示。

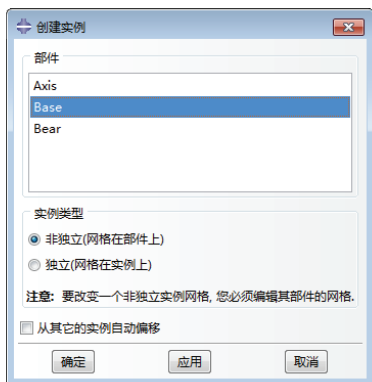


图 10-38 “创建实例”对话框

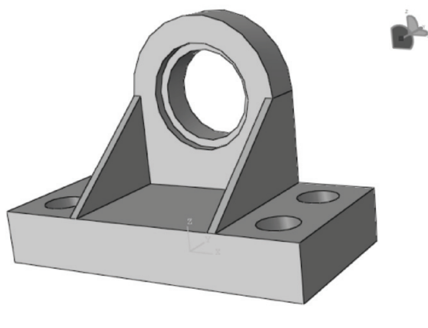


图 10-39 轴承座实例化

（2）参照上述介绍，完成轴瓦与轴的实例化，如图 10-40 所示。

（3）下面开始定义位置关系。单击按钮，先拾取轴承座轴孔，如图 10-41 所示，然后单击中键，再拾取轴瓦与轴承孔接触面，如图 10-42 所示。

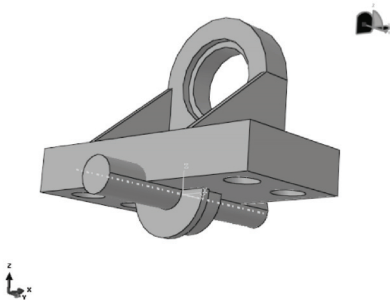


图 10-40 部件实例化

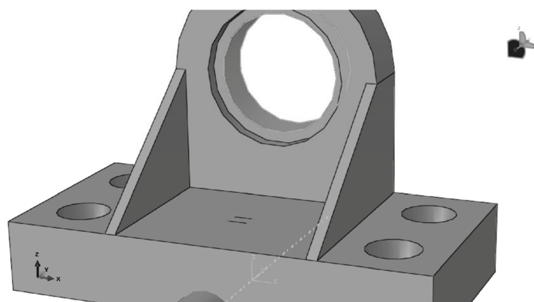


图 10-41 拾取轴承座轴孔

单击中键，完成同轴约束应如图 10-43 所示。

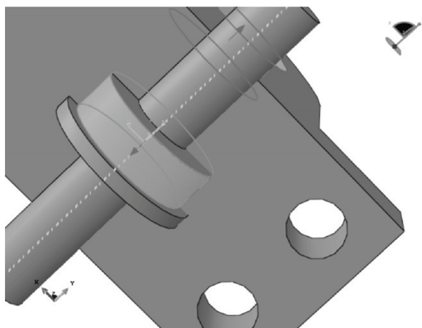


图 10-42 拾取移动部件的接触面

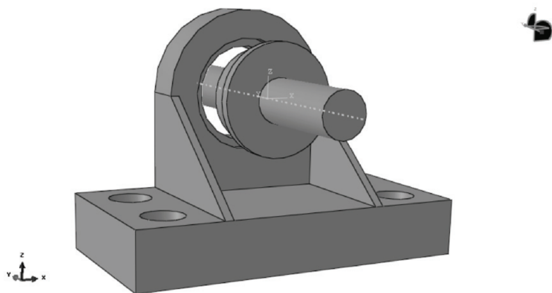


图 10-43 同轴约束（轴瓦与孔对正）

（4）单击按钮，先拾取轴承座轴孔端面，如图 10-44 所示，然后单击中键，再拾取轴瓦与轴承孔接触面如图 10-45 所示。

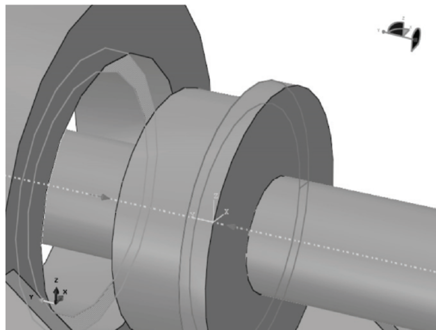


图 10-44　拾取轴承座轴孔端面

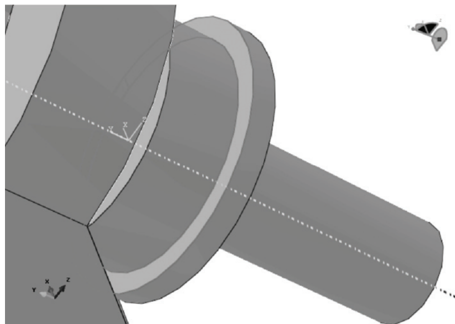


图 10-45　拾取移动部件的接触面

单击中键，完成共面约束如图 10-46 所示。

（5）单击按钮，先拾取轴圆周面，如图 10-47 所示，然后单击中键，再拾取轴瓦与轴接触面如图 10-48 所示。

单击中键，完成同轴约束如图 10-49 所示。

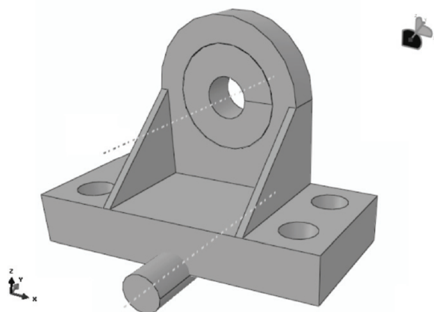


图 10-46　安装轴瓦

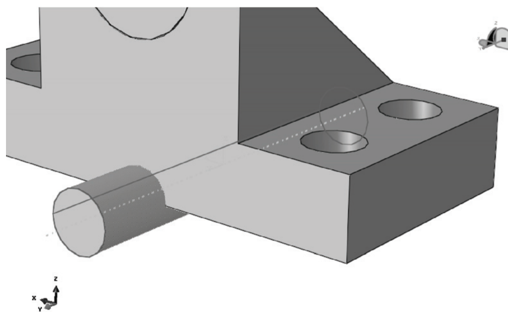


图 10-47　拾取轴圆周面

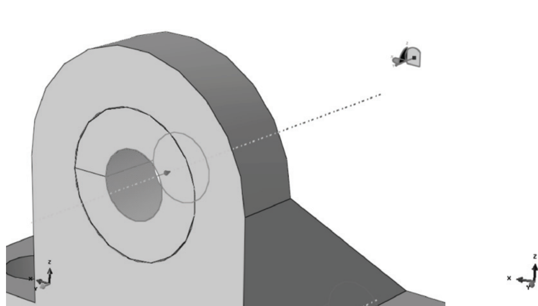


图 10-48　拾取固定部件的接触面

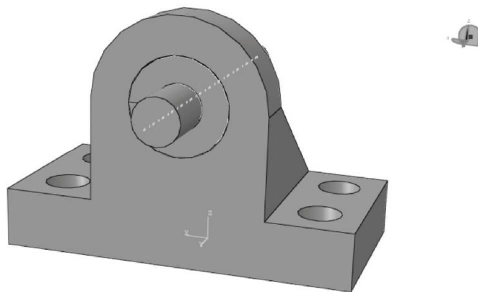


图 10-49　同轴约束（轴与孔对正）

■ 设置分析步与输出请求

（1）单击（创建分析步）按钮，弹出图 10-50 所示的“创建分析步”对话框，用户可

以在此输入分析步的名称，选择分析的类型，在此选择“静力，通用”，单击“继续”，弹出图 10-51 所示的“编辑分析步”对话框。

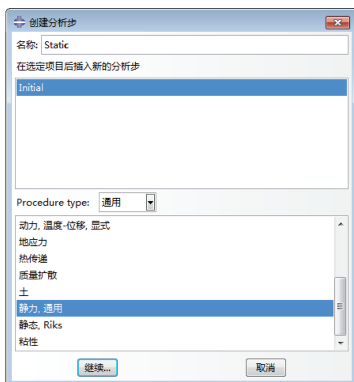


图 10-50 “创建分析步”对话框

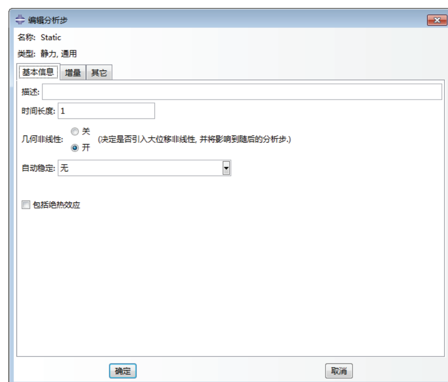


图 10-51 “编辑分析步”对话框

全部采用默认设置即可，单击“确定”完成分析步定义。

（2）单击（场输出管理器），弹出图 10-52 所示的“场输出请求管理器”对话框，单击“编辑”，弹出图 10-53 所示的“编辑场输出请求”对话框，选择输出应力与应变如图 10-54 所示。

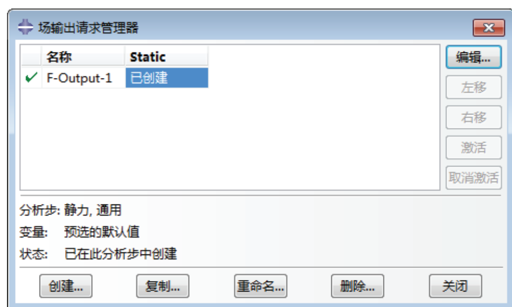


图 10-52 “场输出请求管理器”对话框



图 10-53 “编辑场输出请求”对话框

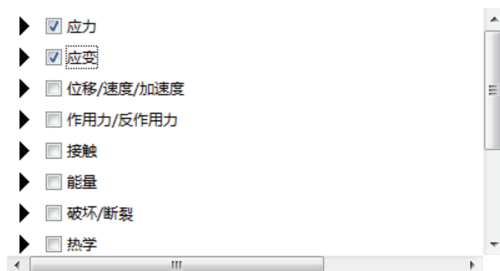


图 10-54 选择输出应力与应变

单击“确定”，并关闭“场输出请求管理器”。

■ 创建显示体约束

在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“相互作用”（Interaction）功能模块。本例需要在该模块中创建显示体约束。

（1）单击工具区中的（创建约束，Create Constraint）工具，弹出“创建约束”（Create Constraint）对话框，在名称栏内输入“DISP_BEAR”，在“类型”（Type）栏内选择“显示体”（Display body），如图 10-55 所示，单击“继续”按钮。在视图区选择轴瓦的实体，弹出“编辑约束”（Edit Constraint）对话框，选择“跟随 3 个点”（Follow three points）单选按钮，如图 10-56 所示。



图 10-55 “创建约束”对话框



图 10-56 “编辑约束”对话框

单击按钮，在视图区中选择轴承座的实体轴承孔壁上的三个点，如图 10-57 所示。

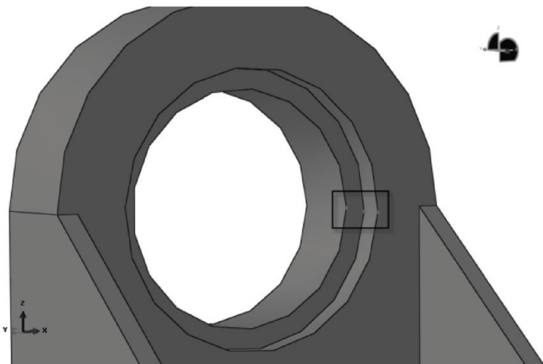


图 10-57 选择三个点

（2）用同样的方法，定义轴的显示体约束，仍跟随上述三个点。

■ 载荷与边界条件

在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“载荷”（Load）功能模块。本例需要对模型施加压力（pressure）与固定边界条件。

由于轴承座对轴承有支撑作用，因此轴承孔圆柱面的下半部分承受径向压力载荷，本例为 50MPa。另外，轴承孔圆周上要承受轴瓦的推力载荷，该载荷也表示成压力形式，本例为 10MPa。

为了方便定义压力载荷时面的选择和以后的检查，创建两个施加压力载荷的“表面”（Surface）。

（1）首先需要分割轴承孔的圆柱面。在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“部件”（Part），进入“部件”（Part）模块分割面。因为“载荷”（Load）模块是对装配件进行操作，若在“载荷”模块中进行分割面的操作，则会出错，如图 10-58 所示。

在环境栏的“部件”（Part）列表中选择“Base”，按住工具区中的（分割面，Partition Face）工具，在弹出的工具箱中选择（Partition Face→Use Shortest Path Between 2 Points）工具。

在视图区选择轴承孔的大圆柱面，单击鼠标中键；再依次选择圆柱面左侧的两个点，如图 10-59 所示，单击鼠标中键，完成该圆柱面的分割。

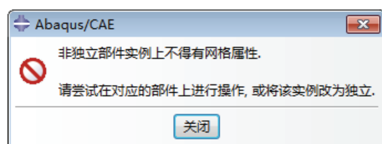


图 10-58 出错提示

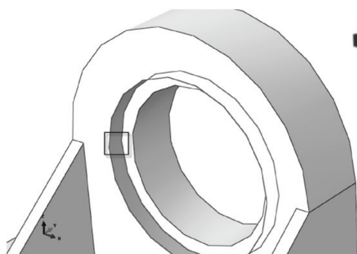


图 10-59 分割面点选取

（2）重复上述操作，完成小圆柱面的分割如图 10-60 所示。

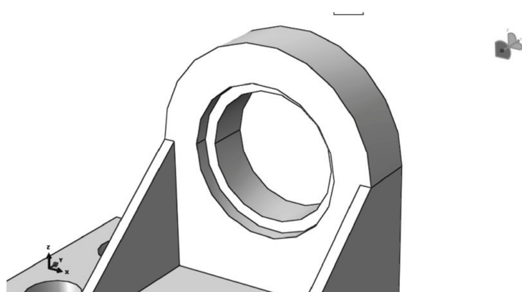


图 10-60 分割小圆柱面

- 载荷

在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“载荷”（Load），回到“载荷”功能模块。接下来将进行载荷与边界条件的定义。

（1）选择“工具（Tools）→表面（Surface）→创建（Create）”命令，弹出“创建表面”（Create Surface）对话框，在“名称”（Name）栏内输入“Surf-Gravity”，单击“继续”（Continue）按钮。按住键盘上的〈Shift〉键，在视图区选择轴承孔的两个圆柱面的下半部分，如图 10-61 所示，单击鼠标中键。

（2）再次选择“工具（Tools）→表面（Surface）→创建（Create）”命令，弹出“创建表面”（Create Surface）对话框，在“名称”（Name）栏内输入“Surf-Push”，单击“继续”（Continue）按钮。按住键盘上的〈Shift〉键，在视图区选择轴承孔的圆环面，如图 10-62 所

示，单击鼠标中键。

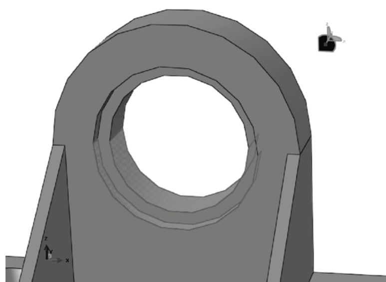


图 10-61　Surf-Gravity 表面

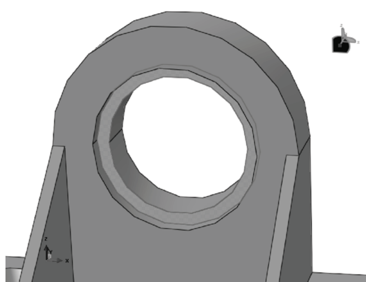


图 10-62　Surf-Push 表面

（3）首先定义轴承孔圆柱面的下半部分的径向压力载荷。单击工具区的“创建载荷”（Create Load）工具，弹出图 10-63 所示的“创建载荷”（Create Load）对话框。

在“名称”（Name）栏内输入“Press-Gravity”，在“分析步”（Step）列表内选择“Static”，在“可用于所选分析步的类型”（Types for Selected Step）栏内选择“压强”（Pressure），单击“继续”（Continue）按钮。

单击提示区右侧的“表面”（Surface）按钮，在弹出的“区域选择”（Region Selection）对话框中选择“Surf-Gravity”。

单击“继续”（Continue）按钮，弹出图 10-64 所示的“编辑载荷”（Edit Load）对话框，在“大小”（Magnitude）栏内输入“50”，单击“确定”按钮。



图 10-63　“创建载荷”对话框



图 10-64　“编辑载荷”对话框

（4）用同样的方法定义轴承孔圆周上的推力载荷 Press-Push。此时，视图区显示出载荷的示意图如图 10-65 所示。

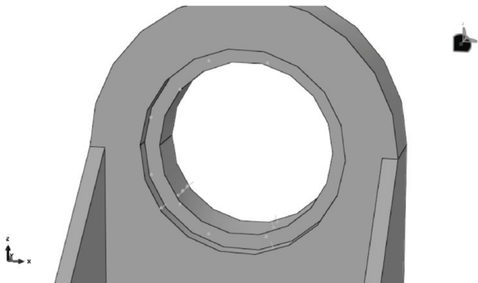


图 10-65　推力载荷

● 边界条件

该轴承座通过 4 个安装孔进行固定，边界条件为固定约束这 4 个安装孔的圆柱面和基座底面。

首先创建施加边界条件的面。

（1）选择“工具（Tools）→集（Set）→创建（Create）”命令，弹出“创建集合”（Create Set）对话框，在“名称”（Name）栏内输入“Set-BC”，单击“继续”（Continue）按钮。

按住键盘上的〈Shift〉键，在视图区选择 4 个安装孔的 4 个圆柱面和基座底面，如图 10-66 所示，单击鼠标中键。

（2）单击工具区中的“创建边界条件”（Create Boundary Condition）工具，弹出“创建边界条件”（Create Boundary Condition）对话框。

在“名称”（Name）栏内输入“BC-Fixed”，在“分析步”（Step）列表内选择“Static”，单击“继续”（Continue）按钮。单击提示区右侧的“集”（Set）按钮，在弹出的“区域选择”（Region Selection）对话框中选择“Set-BC”。

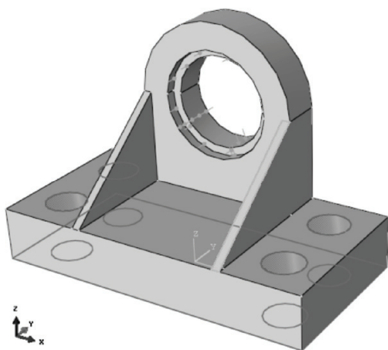


图 10-66　创建 Set-BC 集

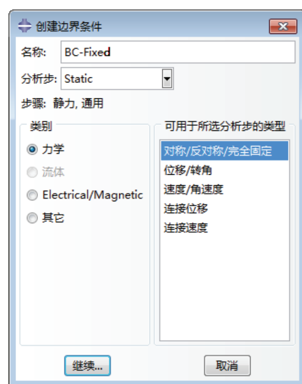


图 10-67　“创建边界条件”对话框

（3）单击“继续”（Continue）按钮，弹出图 10-68 所示的“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框，选择最后一项“完全固定”（ENCASTRE（U1=U2=U3=UR1=UR2= UR3=0）），单击“确定”按钮，完成固定边界条件的施加。

单击工具栏的按钮再次保存该模型。完成边界定义的模型如图 10-69 所示。

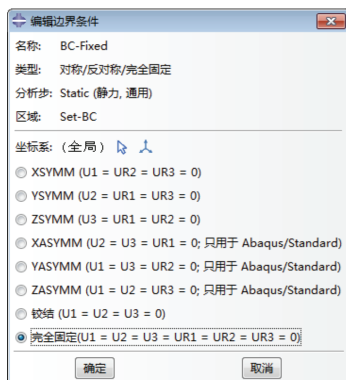


图 10-68　“编辑边界条件”对话框

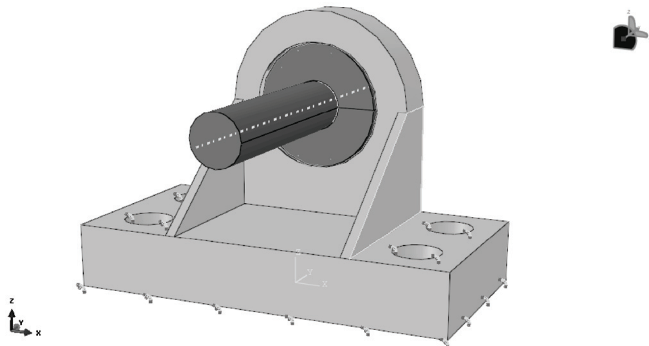


图 10-69　约束

■ 划分网格

在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“网格”（Mesh）功能模块。由于本例的装配件由非独立实体构成，在进行任何操作之前，用户需要先将环境栏的“对象”（Object）选择为“部件”（Part），并在“部件”（Part）列表中选择“Base”。

本例中，由于轴瓦和轴都考虑为显示体，用户只需对轴承座划分网格。

（1）单击工具区中的“种子部件”（Seed Part）工具，弹出“全局种子”（Global Seeds）对话框，如图 10-70 所示，在“近似全局尺寸”（Approximate global size）栏内输入“3”，即单元尺寸大约为 3mm，单击“确定”按钮完成布种如图 10-71 所示。

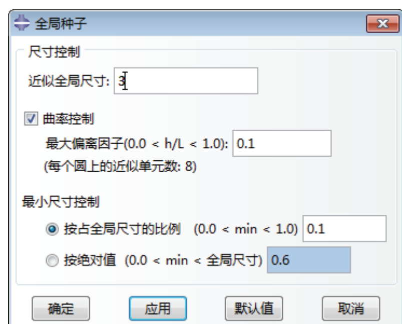


图 10-70 “全局种子”对话框

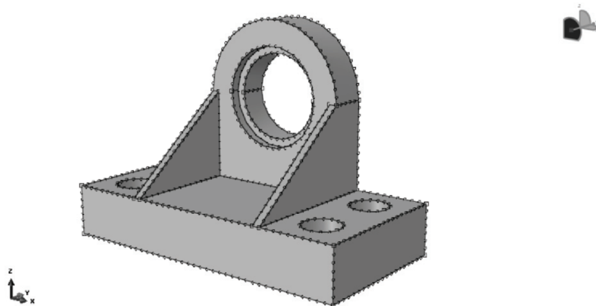


图 10-71 完成布种

（2）单击工具区中的“网格控制”（Assign Mesh Controls）工具，弹出“网格控制属性”（Mesh Controls）对话框，如图 10-72 所示，可见无法对该部件划分六面体单元。

如前所述，用户可以采用四面体单元进行网格划分，或分割模型后采用六面体单元进行网格划分。由于该模型结构较为简单，分割模型不是很麻烦，考虑将模型进行分割，然后采用六面体单元划分网格。

（3）单击工具区中的（拆分几何元素，Partition Cell→Define Cutting Plane）工具，单击提示区中的“三个点”按钮，在视图区中选择基座上表面上的三个点，单击鼠标中键，将该部件分割为两个几何元素。

在视图区选择上部的几何元素，单击鼠标中键，再单击提示区中的“三个点”按钮，在视图区中选择支架前表面上的三个点，单击鼠标中键，将该几何元素分割为三个几何元素。

继续选择包含轴瓦支架的分区，单击鼠标中键，再单击提示区中的“三个点”按钮，在视图区中选择施加推力载荷 Press-Push 的轴承孔圆周面上的三个点，单击鼠标中键，将该几何元素分割为两个几何元素。

至此，轴承座的部件被分割为 5 个几何元素。

用户可以在“部件”（Part）模块中查询部件的几何元素：在环境栏的“模块”（Module）列表中选择“部件”（Part），进入“部件”（Part）模块。

单击工具栏中的“信息查询”（Query information）工具，弹出“查询”（Query）对话框，在“部件查询”（Part Module Queries）栏内选择“部件属性”（Part attributes），单击

“确定”按钮。

信息区中显示“它是一个实体部件（5 几何元素，38 实体面，71 边，44 顶点）”。

分区后的部件如图 10-73 所示。



图 10-72 “网格控制属性”对话框

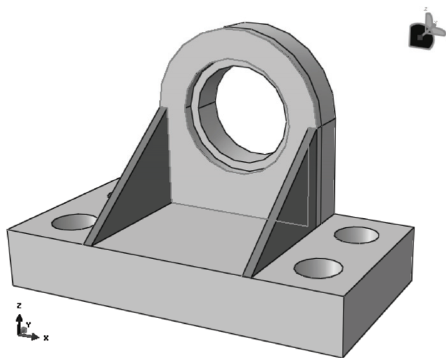


图 10-73 分区（拆分为 5 个几何元素）

（4）单击按钮，在视图区中框选出整个模型，单击中键，弹出图 10-74 所示的“网格控制属性”对话框，注意其与图 10-72 的区别。选择“技术”为“扫掠”，单击“确定”按钮。

（5）单击按钮，在视图区选择整个模型，单击鼠标中键，弹出图 10-75 所示的“单元类型”（Element Type）对话框。

默认的选择是二次六面体减缩积分单元（C3D20R），取消对“单元控制”（Element Controls）栏内“缩减积分”（Reduced integration）的选择，选择二次六面体完全积分单元 C3D20，单击“确定”按钮。



图 10-74 “网格控制属性”对话框

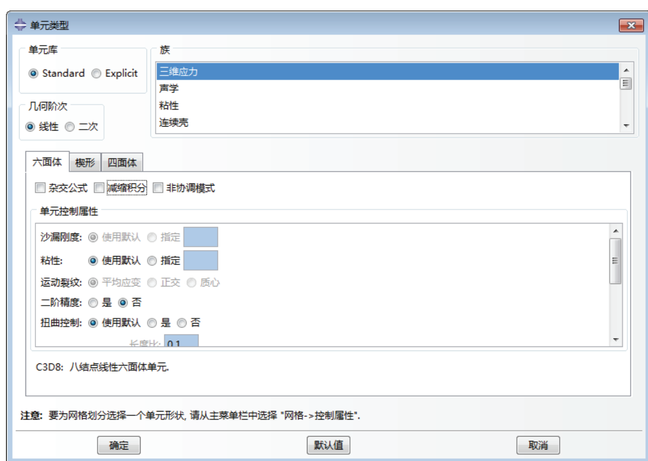
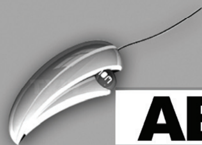


图 10-75 “单元类型”对话框

（6）单击工具区中的（为部件划分网格，Mesh Part）工具，单击提示区的“是”按钮。完成网格划分如图 10-76 所示，信息区显示出“7531 个单元已创建到部件: Base”。



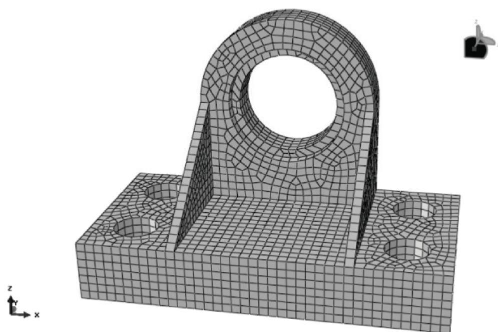


图 10-76 划分网格

■ 运行分析

在环境栏的“模块”(Module)列表中选择“作业”(Job)。

(1)首先创建分析作业。

单击工具区中的“作业管理器”(Job Manager)工具，弹出图 10-77 所示的“作业管理器”对话框。

在管理器中单击“创建”(Create)按钮，弹出图 10-78 所示的“创建作业”(Create Job)对话框，输入作业名称，单击“继续”(Continue)按钮。

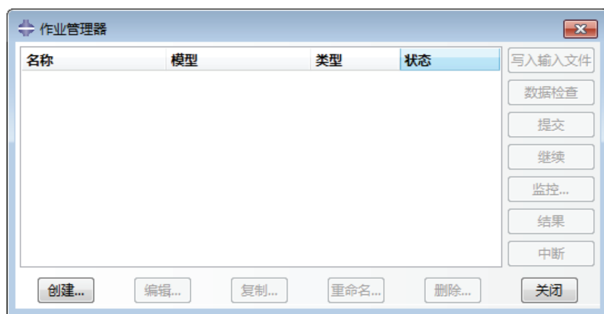


图 10-77 “作业管理器”对话框

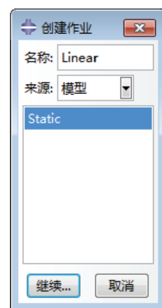


图 10-78 “创建作业”对话框

弹出“编辑作业”(Edit Job)对话框如图 10-79 所示，单击“确定”。

(2)进行数据检查。

回到“作业管理器”，单击“数据检查”，提交数据检查。数据检查完成后，管理器中的“状态”(Status)栏显示为“检查已提交”(Completed)，如图 10-80 所示。

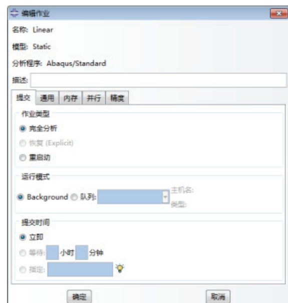


图 10-79 “编辑作业”对话框



图 10-80 “作业管理器”状态显示

（3）提交分析作业。

单击“作业管理器”中的“继续”按钮，提交分析。完成分析后，管理器中的“状态”（Status）栏显示为“已完成”（Completed）。

信息区显示：

“作业输入文件 "Linear.inp" 已提交分析。

Job Linear: Analysis Input File Processor completed successfully.

Job Linear: Abaqus/Standard completed successfully.

Job Linear completed successfully.”

单击工具栏的“保存”按钮保存模型。

■ 后处理

单击“作业管理器”中的“结果”（Results），ABAQUS/CAE 随即进入“可视化”（Visualization）功能模块。

选择“选项（Options）→显示体（Display Body）”命令，弹出图 10-81 所示的“显示体”选项（Display Body Options）对话框。

在“基本信息”（Basic）选项卡选择“无”（No edges）；在“其它”（Other）选项卡内选择“半透明”（Translucency）页面，选择“应用透明”（Apply translucency）复选框，调节透明—不透明（Transparent-Opaque）滑动条到“0.6”，如图 10-82 所示，单击“确定”按钮。

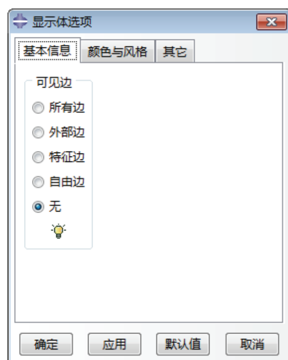


图 10-81 “显示体选项”对话框



图 10-82 “半透明”页面

视图区显示轴承座、轴瓦和轴的无变形图，如图 10-83 所示。

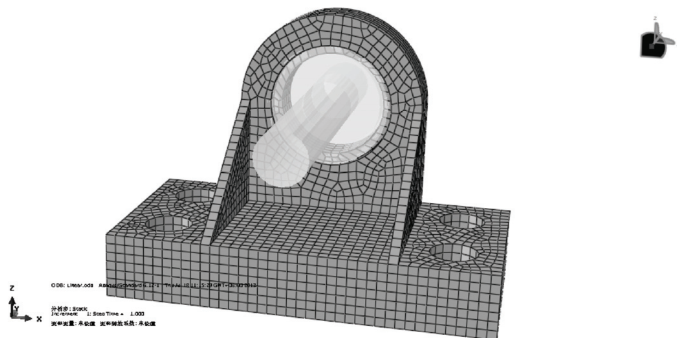


图 10-83 无变形图

单击工具栏的“创建显示组”（Create Display Group）工具，弹出图 10-84 所示的“创建显示组”（Create Display Group）对话框，在“项”（Item）栏中选择“部件实例”（Part instances），在右侧的列表内选择“BASE-1”，单击对话框下端的“相交”（Intersect）工具，视图区仅显示轴承座的模型如图 10-85 所示。

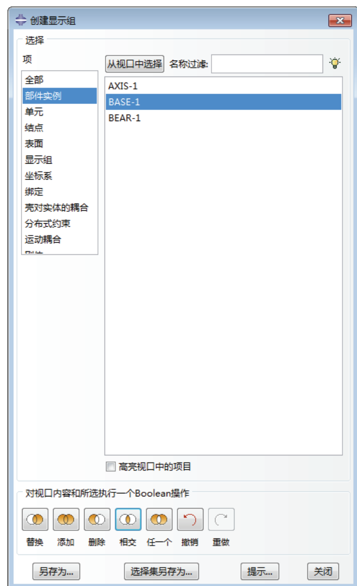


图 10-84 “创建显示组”对话框

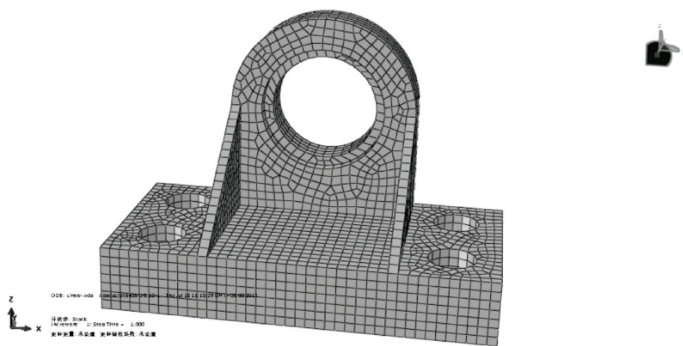


图 10-85 只显示轴承座

单击，选择积分点应变，如图 10-86 所示，单击“确定”，在视图区中显示积分点应变云图，如图 10-87 所示。

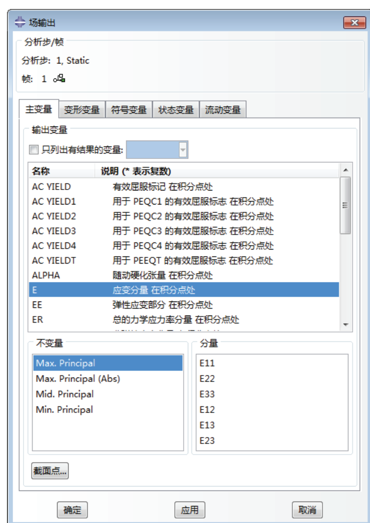


图 10-86 选择积分点应变

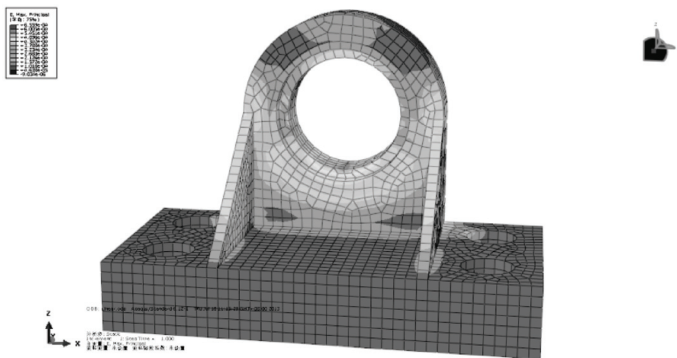


图 10-87 积分点应变云图

单击，选择弹性应变，如图 10-88 所示，单击“确定”，在视图区中显示弹性点应变

云图，如图 10-89 所示。

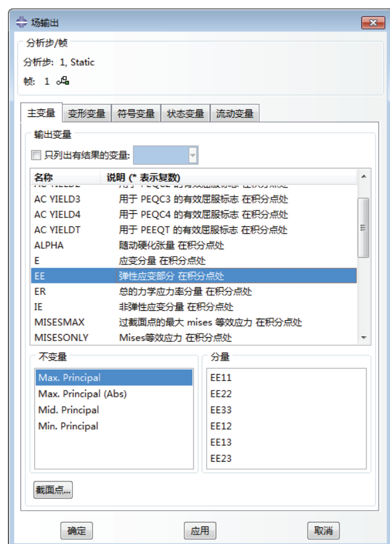


图 10-88　选择弹性应变

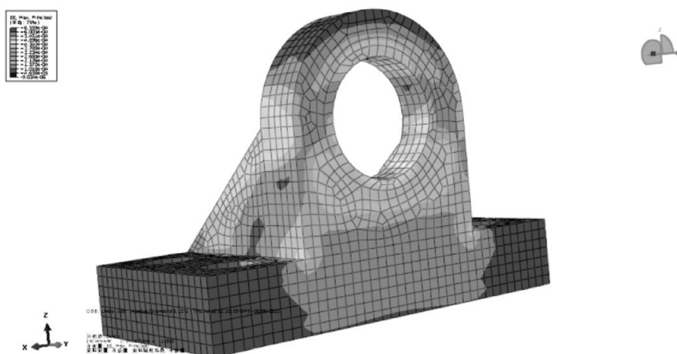


图 10-89　弹性应变云图

单击，选择非弹性应变，如图 10-90 所示，单击“确定”，在视图区中显示非弹性应变云图，如图 10-91 所示。

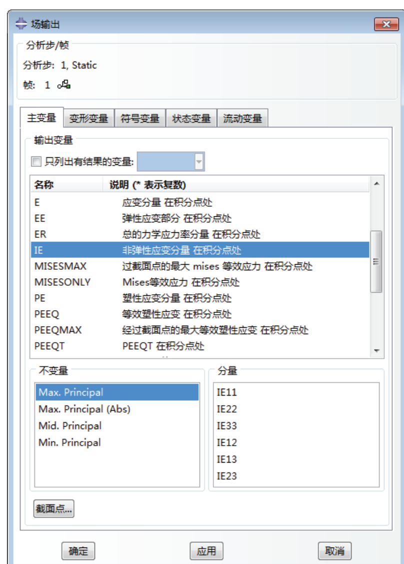


图 10-90　选择非弹性应变

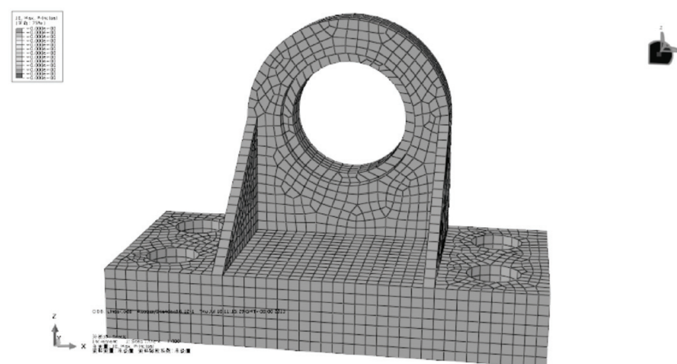


图 10-91　非弹性应变云图

本例为弹性材料，所以在图 10-91 中非弹性应变分量均为零。

单击，选择最大 Mises 应力，如图 10-92 所示，单击“确定”，在视图区中显示最大 Mises 应力云图，如图 10-93 所示。

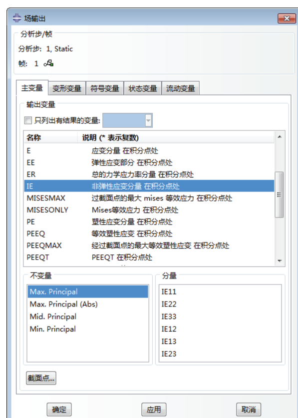


图 10-92　选择最大 Mises 应力

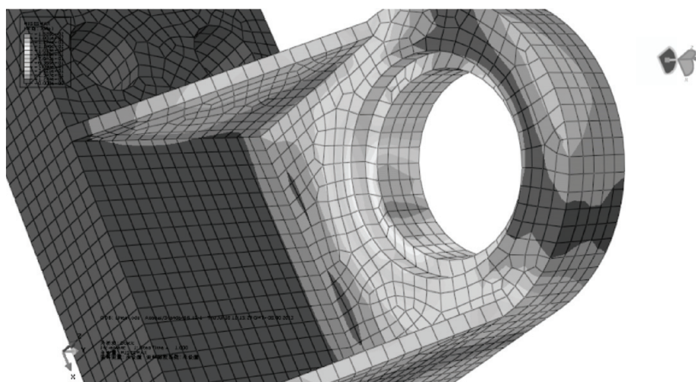
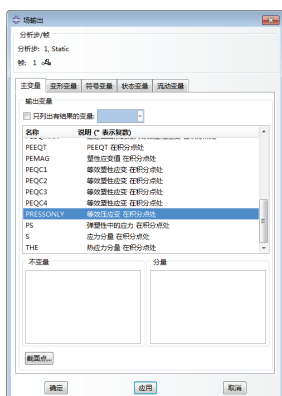


图 10-93　最大 Mises 应力云图

单击，选择等效压应变，如图 10-94 所示，单击“确定”，在视图区中显示等效压应变云图，如图 10-95 所示。



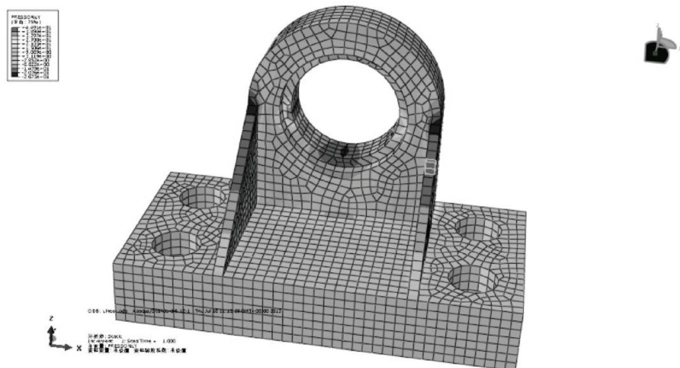


图 10-94　选择等效压应变　　　　图 10-95　等效压应变云图

单击，选择符号变量下的应变，如图 10-96 所示，单击“确定”，在视图区中显示应变符号云图见图 10-97 所示。



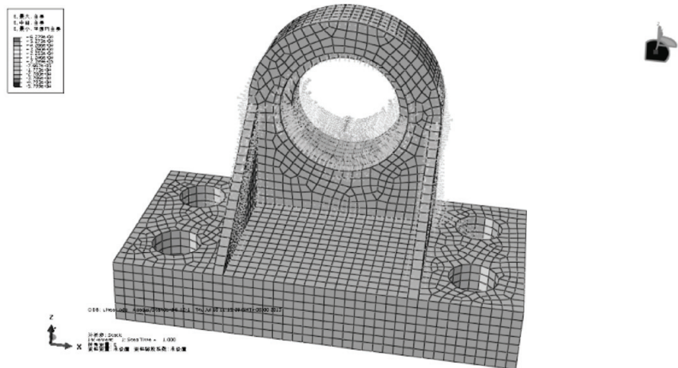


图 10-96　选择符号变量下的应变　　　　图 10-97　应变符号云图

单击，选择符号变量下的应力，如图 10-98 所示，单击“确定”，在视图区中显示应力符号云图见图 10-99 所示。

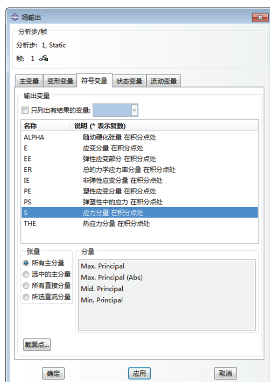


图 10-98　选择符号变量下的应力

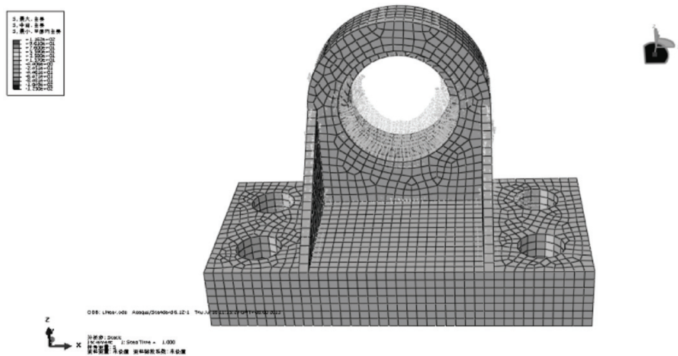


图 10-99　应力符号云图

10.3　初识 INP 文件

如本书开头所述，INP 文件是 ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 的输入文件，在“作业”功能模块中提交任务时自动生成（job_name.inp）。

INP 文件属于文本文件，用户可以在 ABAQUS/CAE 环境下（选择“模型（Model）→编辑关键字（Edit Keywords）”命令）或通过外部文字编辑软件（如记事本、Ultra Edit）对 INP 文件进行编辑，既可以很方便地对模型参数进行修改，也可以实现一些 ABAQUS/CAE 不支持的功能，图 10-100 所示为 ABAQUS/CAE 下的 Edit keywords（关键字编辑器）。

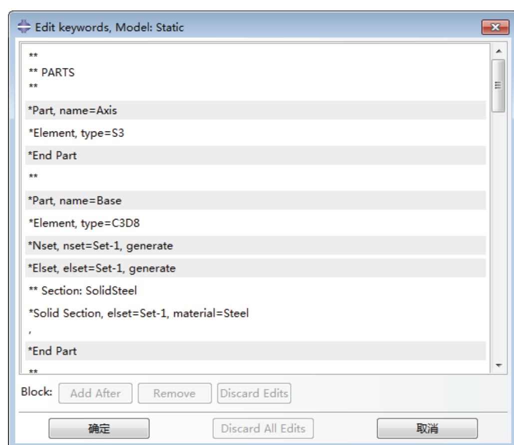


图 10-100　Edit keywords 对话框

10.3.1　INP 文件概述

INP 文件（输入文件，INP 即 input 的缩略形式）是一种文本格式（可以通过 Windows

自带的文本编辑器记事本来编辑，也可以通过 Edit Plus 或者 UltraEdit 等文本编辑软件来编辑）。

INP 文件是在“作业”（Job）功能模块中提交分析作业时通过单击“写入输入文件”（Write Input）按钮生成的。如果读者想要在建立分析模型的过程中修改 INP 文件，在 ABAQUS 的任何一个功能模块下，选择“模型（Model）→编辑关键字（Edit Keywords）”命令，选择要编辑的分析模型就可以进行修改了。

INP 文件的具体内容包含具体分析案例的整个前处理过程（即分析模型的完整描述），可以直接递交 ABAQUS 求解器进行求解。

INP 文件由一系列的数据块构成，每个数据块描述分析模型的某部分特定信息，它们和 ABAQUS/CAE 界面下“模块”（Module）列表中的各个模块相对应，但是各个数据块可能会存在包含关系，其形式可以表现如下。

```
*PART
*END PART
**-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
*ASSEMBLY
……
*INSTANCE
……
*END INSTANCE
……
*END ASSEMBLY
**-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------
*STEP
……
*END STEP
```

一个数据块总是以带有*号的关键词开始，其后往往带有相应的参数，以及一个或多个数据行。如果一行以**开始，则为注释行，其内容在分析中不起作用。

10.3.2 INP 文件实例讲解

下面对本章实例的 INP 文件进行详细说明。

在工作目录下用记事本打开 Linear.inp。该文件包含模型的结点、单元、集合、截面和材料属性、载荷和边界条件、分析步及输出设置等信息，这些信息用关键词及其参数和数据行表示。关键词以*开头，注释行以**开头。

```
*******************************************************************************
**定义分析标题
*Heading
** Job name: Linear Model name: Static（注释，显示模型与作业名称）
** Generated by: Abaqus/CAE 6.12-1（注释，显示当前 ABAQUS/CAE 的版本）
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**设置 dat 文件中打印输出的选项
**
```



```
** PARTS
**提示接下来将开始创建部件
**创建部件，名称为 Axis
*Part, name=Axis
**定义结点，格式为：结点号,X 坐标,Y 坐标,Z 坐标
*Node
1,8., 50.,0.
2,8.,-50.,0.
3,7.39103603,-50.,3.06146741
4,5.65685415,-50.,5.65685415
5,3.06146741,-50.,7.39103603
6,0.,-50.,8.
7,-3.06146741,-50.,7.39103603
8,-5.65685415,-50.,5.65685415
9,-7.39103603,-50.,3.06146741
10, -8.,-50.,0.
11,-7.39103603,-50.,-3.06146741
12,-5.65685415,-50.,-5.65685415
13,-3.06146741,-50.,-7.39103603
14,0.,-50., -8.
15,3.06146741,-50.,-7.39103603
16,5.65685415,-50.,-5.65685415
17,7.39103603,-50.,-3.06146741
18,7.39103603, 50.,3.06146741
19,5.65685415, 50.,5.65685415
20,3.06146741, 50.,7.39103603
21,0., 50.,8.
22,-3.06146741, 50.,7.39103603
23,-5.65685415, 50.,5.65685415
24,-7.39103603, 50.,3.06146741
25, -8., 50.,0.
26,-7.39103603, 50.,-3.06146741
27,-5.65685415, 50.,-5.65685415
28,-3.06146741, 50.,-7.39103603
29,0., 50., -8.
30,3.06146741, 50.,-7.39103603
31,5.65685415, 50.,-5.65685415
32,7.39103603, 50.,-3.06146741
33,7.39103603,-50.,3.06146741
34,5.65685415,-50.,5.65685415
35,3.06146741,-50.,7.39103603
36,0.,-50.,8.
37,-3.06146741,-50.,7.39103603
38,-5.65685415,-50.,5.65685415
39,-7.39103603,-50.,3.06146741
40, -8.,-50.,0.
41,-7.39103603,-50.,-3.06146741
```

```
42,-5.65685415,-50.,-5.65685415
43,-3.06146741,-50.,-7.39103603
44,0.,-50., -8.
45,3.06146741,-50.,-7.39103603
46,5.65685415,-50.,-5.65685415
47,7.39103603,-50.,-3.06146741
48,8.,-50.,0.
49,7.39103603, 50.,3.06146741
50,5.65685415, 50.,5.65685415
51,3.06146741, 50.,7.39103603
52,0., 50.,8.
53,-3.06146741, 50.,7.39103603
54,-5.65685415, 50.,5.65685415
55,-7.39103603, 50.,3.06146741
56, -8., 50.,0.
57,-7.39103603, 50.,-3.06146741
58,-5.65685415, 50.,-5.65685415
59,-3.06146741, 50.,-7.39103603
60,0., 50., -8.
61,3.06146741, 50.,-7.39103603
62,5.65685415, 50.,-5.65685415
63,7.39103603, 50.,-3.06146741
64,8., 50.,0.
**定义 S3 单元，格式为：“单元号,结点号,结点号,结点号,……,结点号”
*Element, type=S3
 1,1,2, 32
 2, 32,2, 17
 3, 31, 17, 16
 4, 30, 16, 15
 5, 29, 15, 14
 6, 28, 14, 13
 7, 27, 13, 12
 8, 26, 12, 11
 9, 25, 11, 10
10, 24, 10,9
11, 23,9,8
12, 22,8,7
13, 21,7,6
14, 20,6,5
15, 19,5,4
16, 18,4,3
17,1,3,2
18,1, 18,3
19, 18, 19,4
20, 19, 20,5
21, 20, 21,6
22, 21, 22,7
```



```
23, 22, 23,8
24, 23, 24,9
25, 24, 25, 10
26, 25, 26, 11
27, 26, 27, 12
28, 27, 28, 13
29, 28, 29, 14
30, 29, 30, 15
31, 30, 31, 16
32, 31, 32, 17
33, 35, 37, 34
34, 35, 36, 37
35, 34, 38, 33
36, 34, 37, 38
37, 38, 39, 33
38, 33, 39, 48
39, 48, 39, 40
40, 47, 40, 41
41, 46, 41, 42
42, 45, 42, 43
43, 44, 45, 43
44, 45, 46, 42
45, 46, 47, 41
46, 47, 48, 40
47, 61, 59, 62
48, 61, 60, 59
49, 62, 58, 63
50, 62, 59, 58
51, 58, 57, 63
52, 63, 57, 64
53, 64, 57, 56
54, 49, 56, 55
55, 50, 55, 54
56, 51, 54, 53
57, 52, 51, 53
58, 51, 50, 54
59, 50, 49, 55
60, 49, 64, 56
*End Part
**
**出现“End Part”关键词，Axis 部件的单元创建完毕
**
**开始创建 Base 部件
*Part, name=Base
**Base 部件的结点
*Node
1,31.25, 15., 20.
```

```
2,31.25, 15., 55.
3,31.25,-30., 20.
4,28.25, 15., 55.
5,28.25, 15., 20.
6,28.25,-30., 20.
7, -25.75, 15., 20.
8, -25.75, 15., 55.
9, -25.75,-30., 20.
10, -28.75, 15., 55.
** ...此处省略 11～9810 号结点的坐标
9811,-40.9298668,-2.04859304,2.85714293
9812,-54.8204689,11.2375088,2.85714293
9813,-54.213028,-16.7518291,2.85714293
9814,-54.091774,-18.5342751,2.85714293
9815,-53.4830284,-20.1554585,2.85714293
9816,-46.9754028,0.744231224,2.85714293
9817,-54.2860985,-2.26602626,2.85714293
9818,-54.1978836,-21.0683632,2.85714293
9819,-55.0103836,-22.1302471,2.85714293
9820,-48.0520248,2.85562134,2.85714293
9821,-36.1284447,0.841411173,2.85714293
9822,-37.5174026,3.81935716,2.85714293
9823,-35.8933372,3.72919393,2.85714293
**定义单元，单元类型为 C3D8
*Element, type=C3D8
1,932,926,48,47, 1026, 1020,95,96
2,927,56, 2,55, 1021,130, 4,88
3,985,996,927,928, 1079, 1090, 1021, 1022
4,55,54,928,927,88,89, 1022, 1021
5,54,53,933,928,89,90, 1027, 1022
6,59,953,954,60,127, 1047, 1048,126
7,983,974,954,978, 1077, 1068, 1048, 1072
8,929,931,52,51, 1023, 1025,91,92
9,930,934,50,49, 1024, 1028,93,94
 10,51,50,934,929,92,93, 1028, 1023
**此处省略 11～7510 号单元的结点编号
7511, 9787, 9786, 9690, 9789, 3595, 3594, 3498, 3597
7512, 9692, 9823, 9822, 9801, 3500, 3631, 3630, 3609
7513, 9785, 9800, 9675, 9757, 3593, 3608, 3483, 3565
7514, 9687, 9791, 9811, 9783, 3495, 3599, 3619, 3591
7515, 9787, 9673, 9788, 9790, 3595, 3481, 3596, 3598
7516, 9784, 9820, 9685, 9792, 3592, 3628, 3493, 3600
7517, 9774, 9778, 9687, 9783, 3582, 3586, 3495, 3591
7518, 9785, 9788, 9689, 9800, 3593, 3596, 3497, 3608
7519, 9784, 9792, 9690, 9786, 3592, 3600, 3498, 3594
7520, 9787, 9811, 9791, 9673, 3595, 3619, 3599, 3481
7521, 9782, 9816, 9790, 9788, 3590, 3624, 3598, 3596
```



```
7522, 9801, 9822, 9777, 9695, 3609, 3630, 3585, 3503
7523, 9807, 9683, 9681, 9806, 3615, 3491, 3489, 3614
7524, 9740, 9759, 9699, 9810, 3548, 3567, 3507, 3618
7525, 9734, 9735, 9677, 9812, 3542, 3543, 3485, 3620
7526, 9798, 9678, 9814, 9813, 3606, 3486, 3622, 3621
7527, 9725, 9814, 9815, 9818, 3533, 3622, 3623, 3626
7528, 9820, 9784, 9786, 9816, 3628, 3592, 3594, 3624
7529, 9819, 9818, 9768, 9764, 3627, 3626, 3576, 3572
7530, 9776, 9773, 9685, 9820, 3584, 3581, 3493, 3628
7531, 9777, 9822, 9823, 9821, 3585, 3630, 3631, 3629
**定义结点集合，包含了 Base 部件的全部结点
*Nset, nset=Set-1, generate
 1,9823,1
**定义单元集合，包含了 Base 部件的全部单元
*Elset, elset=Set-1, generate
 1,7531,1
**定义 SolidSteel 截面
** Section: SolidSteel
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel,
*End Part
**完成 Base 部件相关属性定义
**
**开始创建 Bear 部件
**
*Part, name=Bear
**定义 Bear 部件的结点
*Node
1, 17.,6.25,0.
2, 17., -5.,0.
3,16.5417633, -5.,3.92046976
4,15.1917553, -5.,7.62958622
5,13.0227556, -5.,10.9273891
6,10.1516962, -5.,13.6360941
7,6.733356, -5.,15.6096735
8,2.95201898, -5.,16.7417316
9,-0.98846209, -5.,16.9712391
10,-4.87565517, -5.,16.2858219
11,-8.5, -5.,14.7224321
12,-11.6661081, -5.,12.3653517
13,-14.2032928, -5.,9.34165287
14,-15.9747744, -5., 5.8143425
15,-16.8850517, -5.,1.97357953
16,-16.8850517, -5.,-1.97357953
17,-15.9747744, -5.,-5.8143425
18,-14.2032928, -5.,-9.34165287
19,-11.6661081, -5.,-12.3653517
20,-8.5, -5.,-14.7224321
```

```
21,-4.87565517, -5.,-16.2858219
22,-0.98846209, -5.,-16.9712391
23,2.95201898, -5.,-16.7417316
24,6.733356, -5.,-15.6096735
25,10.1516962, -5.,-13.6360941
26,13.0227556, -5.,-10.9273891
27,15.1917553, -5.,-7.62958622
28,16.5417633, -5.,-3.92046976
29,16.5417633,6.25,3.92046976
30,15.1917553,6.25,7.62958622
31,13.0227556,6.25,10.9273891
32,10.1516962,6.25,13.6360941
33,6.733356,6.25,15.6096735
34,2.95201898,6.25,16.7417316
35,-0.98846209,6.25,16.9712391
36,-4.87565517,6.25,16.2858219
37,-8.5,6.25,14.7224321
38,-11.6661081,6.25,12.3653517
39,-14.2032928,6.25,9.34165287
40,-15.9747744,6.25, 5.8143425
41,-16.8850517,6.25,1.97357953
42,-16.8850517,6.25,-1.97357953
43,-15.9747744,6.25,-5.8143425
44,-14.2032928,6.25,-9.34165287
45,-11.6661081,6.25,-12.3653517
46,-8.5,6.25,-14.7224321
47,-4.87565517,6.25,-16.2858219
48,-0.98846209,6.25,-16.9712391
49,2.95201898,6.25,-16.7417316
50,6.733356,6.25,-15.6096735
51,10.1516962,6.25,-13.6360941
52,13.0227556,6.25,-10.9273891
53,15.1917553,6.25,-7.62958622
54,16.5417633,6.25,-3.92046976
55, 17., -5.,0.
56, 20., -5.,0.
57, 19.562952, -5.,4.15823364
58,18.2709084, -5., 8.1347332
59,16.1803398, -5.,11.7557049
60,13.3826122, -5.,14.8628969
61, 10., -5., 17.320509
62,6.18033981, -5.,19.0211296
63,2.09056926, -5.,19.8904381
64,-2.09056926, -5.,19.8904381
65,-6.18033981, -5.,19.0211296
66,-10., -5., 17.320509
67,-13.3826122, -5.,14.8628969
```



68,-16.1803398, -5.,11.7557049
69,-18.2709084, -5., 8.1347332
70,-19.562952, -5.,4.15823364
71,-20., -5.,0.
72,-19.562952, -5.,-4.15823364
73,-18.2709084, -5.,-8.1347332
74,-16.1803398, -5.,-11.7557049
75,-13.3826122, -5.,-14.8628969
76,-10., -5.,-17.320509
77,-6.18033981, -5.,-19.0211296
78,-2.09056926, -5.,-19.8904381
79,2.09056926, -5.,-19.8904381
80,6.18033981, -5.,-19.0211296
81, 10., -5.,-17.320509
82,13.3826122, -5.,-14.8628969
83,16.1803398, -5.,-11.7557049
84,18.2709084, -5.,-8.1347332
85, 19.562952, -5.,-4.15823364
86,16.5417633, -5.,3.92046976
87,15.1917553, -5.,7.62958622
88,13.0227556, -5.,10.9273891
89,10.1516962, -5.,13.6360941
90,6.733356, -5.,15.6096735
91,2.95201898, -5.,16.7417316
92,-0.98846209, -5.,16.9712391
93,-4.87565517, -5.,16.2858219
94,-8.5, -5.,14.7224321
95,-11.6661081, -5.,12.3653517
96,-14.2032928, -5.,9.34165287
97,-15.9747744, -5., 5.8143425
98,-16.8850517, -5.,1.97357953
99,-16.8850517, -5.,-1.97357953
100,-15.9747744, -5.,-5.8143425
101,-14.2032928, -5.,-9.34165287
102,-11.6661081, -5.,-12.3653517
103,-8.5, -5.,-14.7224321
104,-4.87565517, -5.,-16.2858219
105,-0.98846209, -5.,-16.9712391
106,2.95201898, -5.,-16.7417316
107,6.733356, -5.,-15.6096735
108,10.1516962, -5.,-13.6360941
109,13.0227556, -5.,-10.9273891
110,15.1917553, -5.,-7.62958622
111,16.5417633, -5.,-3.92046976
112, 20., -5.,0.
113, 20.,-8.75,0.
114, 19.562952,-8.75,4.15823364

```
115,18.2709084,-8.75, 8.1347332
116,16.1803398,-8.75,11.7557049
117,13.3826122,-8.75,14.8628969
118, 10.,-8.75, 17.320509
119,6.18033981,-8.75,19.0211296
120,2.09056926,-8.75,19.8904381
121,-2.09056926,-8.75,19.8904381
122,-6.18033981,-8.75,19.0211296
123,-10.,-8.75, 17.320509
124,-13.3826122,-8.75,14.8628969
125,-16.1803398,-8.75,11.7557049
126,-18.2709084,-8.75, 8.1347332
127,-19.562952,-8.75,4.15823364
128,-20.,-8.75,0.
129,-19.562952,-8.75,-4.15823364
130,-18.2709084,-8.75,-8.1347332
131,-16.1803398,-8.75,-11.7557049
132,-13.3826122,-8.75,-14.8628969
133,-10.,-8.75,-17.320509
134,-6.18033981,-8.75,-19.0211296
135,-2.09056926,-8.75,-19.8904381
136,2.09056926,-8.75,-19.8904381
137,6.18033981,-8.75,-19.0211296
138, 10.,-8.75,-17.320509
139,13.3826122,-8.75,-14.8628969
140,16.1803398,-8.75,-11.7557049
141,18.2709084,-8.75,-8.1347332
142, 19.562952,-8.75,-4.15823364
143, 19.562952, -5.,4.15823364
144,18.2709084, -5., 8.1347332
145,16.1803398, -5.,11.7557049
146,13.3826122, -5.,14.8628969
147, 10., -5., 17.320509
148,6.18033981, -5.,19.0211296
149,2.09056926, -5.,19.8904381
150,-2.09056926, -5.,19.8904381
151,-6.18033981, -5.,19.0211296
152,-10., -5., 17.320509
153,-13.3826122, -5.,14.8628969
154,-16.1803398, -5.,11.7557049
155,-18.2709084, -5., 8.1347332
156,-19.562952, -5.,4.15823364
157,-20., -5.,0.
158,-19.562952, -5.,-4.15823364
159,-18.2709084, -5.,-8.1347332
160,-16.1803398, -5.,-11.7557049
161,-13.3826122, -5.,-14.8628969
```



162,-10., -5.,-17.320509
163,-6.18033981, -5.,-19.0211296
164,-2.09056926, -5.,-19.8904381
165,2.09056926, -5.,-19.8904381
166,6.18033981, -5.,-19.0211296
167, 10., -5.,-17.320509
168,13.3826122, -5.,-14.8628969
169,16.1803398, -5.,-11.7557049
170,18.2709084, -5.,-8.1347332
171, 19.562952, -5.,-4.15823364
172, 20.,-8.75,0.
173,8.,-8.75,0.
174,7.56653786,-8.75,2.59759569
175,6.31312418,-8.75,4.91370153
176,4.37558508,-8.75,6.69733191
177,1.96388388,-8.75,7.75520229
178, -0.660634756,-8.75, 7.9726758
179,-3.21356344,-8.75,7.32618666
180,-5.41825247,-8.75, 5.8857913
181,-7.03578997,-8.75,3.80757904
182,-7.8908906,-8.75,1.31675673
183,-7.8908906,-8.75,-1.31675673
184,-7.03578997,-8.75,-3.80757904
185,-5.41825247,-8.75,-5.8857913
186,-3.21356344,-8.75,-7.32618666
187, -0.660634756,-8.75,-7.9726758
188,1.96388388,-8.75,-7.75520229
189,4.37558508,-8.75,-6.69733191
190,6.31312418,-8.75,-4.91370153
191,7.56653786,-8.75,-2.59759569
192, 19.562952,-8.75,4.15823364
193,18.2709084,-8.75, 8.1347332
194,16.1803398,-8.75,11.7557049
195,13.3826122,-8.75,14.8628969
196, 10.,-8.75, 17.320509
197,6.18033981,-8.75,19.0211296
198,2.09056926,-8.75,19.8904381
199,-2.09056926,-8.75,19.8904381
200,-6.18033981,-8.75,19.0211296
201,-10.,-8.75, 17.320509
202,-13.3826122,-8.75,14.8628969
203,-16.1803398,-8.75,11.7557049
204,-18.2709084,-8.75, 8.1347332
205,-19.562952,-8.75,4.15823364
206,-20.,-8.75,0.
207,-19.562952,-8.75,-4.15823364
208,-18.2709084,-8.75,-8.1347332

209,-16.1803398,-8.75,-11.7557049
210,-13.3826122,-8.75,-14.8628969
211,-10.,-8.75,-17.320509
212,-6.18033981,-8.75,-19.0211296
213,-2.09056926,-8.75,-19.8904381
214,2.09056926,-8.75,-19.8904381
215,6.18033981,-8.75,-19.0211296
216, 10.,-8.75,-17.320509
217,13.3826122,-8.75,-14.8628969
218,16.1803398,-8.75,-11.7557049
219,18.2709084,-8.75,-8.1347332
220, 19.562952,-8.75,-4.15823364
221,8.,-8.75,0.
222,8.,6.25,0.
223,7.56653786,6.25,2.59759569
224,6.31312418,6.25,4.91370153
225,4.37558508,6.25,6.69733191
226,1.96388388,6.25,7.75520229
227, -0.660634756,6.25, 7.9726758
228,-3.21356344,6.25,7.32618666
229,-5.41825247,6.25, 5.8857913
230,-7.03578997,6.25,3.80757904
231,-7.8908906,6.25,1.31675673
232,-7.8908906,6.25,-1.31675673
233,-7.03578997,6.25,-3.80757904
234,-5.41825247,6.25,-5.8857913
235,-3.21356344,6.25,-7.32618666
236, -0.660634756,6.25,-7.9726758
237,1.96388388,6.25,-7.75520229
238,4.37558508,6.25,-6.69733191
239,6.31312418,6.25,-4.91370153
240,7.56653786,6.25,-2.59759569
241,7.56653786,-8.75,2.59759569
242,6.31312418,-8.75,4.91370153
243,4.37558508,-8.75,6.69733191
244,1.96388388,-8.75,7.75520229
245, -0.660634756,-8.75, 7.9726758
246,-3.21356344,-8.75,7.32618666
247,-5.41825247,-8.75, 5.8857913
248,-7.03578997,-8.75,3.80757904
249,-7.8908906,-8.75,1.31675673
250,-7.8908906,-8.75,-1.31675673
251,-7.03578997,-8.75,-3.80757904
252,-5.41825247,-8.75,-5.8857913
253,-3.21356344,-8.75,-7.32618666
254, -0.660634756,-8.75,-7.9726758
255,1.96388388,-8.75,-7.75520229

256,4.37558508,-8.75,-6.69733191
257,6.31312418,-8.75,-4.91370153
258,7.56653786,-8.75,-2.59759569
259,8.,6.25,0.
260, 17.,6.25,0.
261,16.5417633,6.25,3.92046976
262,15.1917553,6.25,7.62958622
263,13.0227556,6.25,10.9273891
264,10.1516962,6.25,13.6360941
265,6.733356,6.25,15.6096735
266,2.95201898,6.25,16.7417316
267,-0.98846209,6.25,16.9712391
268,-4.87565517,6.25,16.2858219
269,-8.5,6.25,14.7224321
270,-11.6661081,6.25,12.3653517
271,-14.2032928,6.25,9.34165287
272,-15.9747744,6.25, 5.8143425
273,-16.8850517,6.25,1.97357953
274,-16.8850517,6.25,-1.97357953
275,-15.9747744,6.25,-5.8143425
276,-14.2032928,6.25,-9.34165287
277,-11.6661081,6.25,-12.3653517
278,-8.5,6.25,-14.7224321
279,-4.87565517,6.25,-16.2858219
280,-0.98846209,6.25,-16.9712391
281,2.95201898,6.25,-16.7417316
282,6.733356,6.25,-15.6096735
283,10.1516962,6.25,-13.6360941
284,13.0227556,6.25,-10.9273891
285,15.1917553,6.25,-7.62958622
286,16.5417633,6.25,-3.92046976
287,7.56653786,6.25,2.59759569
288,6.31312418,6.25,4.91370153
289,4.37558508,6.25,6.69733191
290,1.96388388,6.25,7.75520229
291, -0.660634756,6.25, 7.9726758
292,-3.21356344,6.25,7.32618666
293,-5.41825247,6.25, 5.8857913
294,-7.03578997,6.25,3.80757904
295,-7.8908906,6.25,1.31675673
296,-7.8908906,6.25,-1.31675673
297,-7.03578997,6.25,-3.80757904
298,-5.41825247,6.25,-5.8857913
299,-3.21356344,6.25,-7.32618666
300, -0.660634756,6.25,-7.9726758
301,1.96388388,6.25,-7.75520229
302,4.37558508,6.25,-6.69733191



```
  303,6.31312418,6.25,-4.91370153
  304,7.56653786,6.25,-2.59759569
**定义 Bear 部件的单元，单元类型为 S3
*Element, type=S3
1,2,28,1
2,1,28,54
3,54,28,27
4,53,27,26
5,52,26,25
6,51,25,24
7,50,24,23
8,49,23,22
9,48,22,21
  10,47,21,20
  11,46,20,19
  12,45,19,18
  13,44,18,17
  14,43,17,16
  15,42,16,41
  16,42,43,16
  17,16,15,41
  18,41,15,14
  19,40,14,13
  20,39,13,12
  21,38,12,11
  22,37,11,10
  23,36,10,9
  24,35,9,8
  25,34,8,7
  26,33,7,6
  27,32,6,5
  28,31,5,4
  29,30,4,3
  30,29,3,2
  31,1,29,2
  32,29,30,3
  33,30,31,4
  34,31,32,5
  35,32,33,6
  36,33,34,7
  37,34,35,8
  38,35,36,9
  39,36,37,10
  40,37,38,11
  41,38,39,12
  42,39,40,13
  43,40,41,14
```

44,43,44,17
45,44,45,18
46,45,46,19
47,46,47,20
48,47,48,21
49,48,49,22
50,49,50,23
51,50,51,24
52,51,52,25
53,52,53,26
54,53,54,27
55,56,85,55
56,55,85, 111
57, 111,85,84
58, 110,84,83
59, 109,83,82
60, 108,82,81
61, 107,81,80
62, 106,80,79
63, 105,79,78
64, 104,78,77
65, 103,77,76
66,75, 103,76
67,75, 102, 103
68,75,74, 102
69, 102,74, 101
70, 101,74,73
71, 100,73,72
72,99,72,71
73,98,71,70
74,97,70,69
75,96,69,68
76,95,68,67
77,94,67,66
78,65,94,66
79,65,93,94
80,65,64,93
81,93,64,92
82,92,64,63
83,91,63,62
84,90,62,61
85,89,61,60
86,88,60,59
87,87,59,58
88,86,58,57
89,55,57,56
90,55,86,57



91,86,87,58
92,87,88,59
93,88,89,60
94,89,90,61
95,90,91,62
96,91,92,63
97,94,95,67
98,95,96,68
99,96,97,69
100,97,98,70
101,98,99,71
102,99, 100,72
103, 100, 101,73
104, 103, 104,77
105, 104, 105,78
106, 105, 106,79
107, 106, 107,80
108, 107, 108,81
109, 108, 109,82
110, 109, 110,83
111, 110, 111,84
112, 113, 142, 112
113, 112, 142, 171
114, 171, 142, 141
115, 170, 141, 140
116, 169, 140, 139
117, 168, 139, 138
118, 167, 138, 137
119, 166, 137, 136
120, 165, 136, 135
121, 164, 135, 134
122, 163, 134, 133
123, 162, 133, 132
124, 161, 132, 131
125, 160, 131, 130
126, 159, 130, 129
127, 158, 129, 157
128, 158, 159, 129
129, 129, 128, 157
130, 157, 128, 156
131, 156, 128, 127
132, 126, 156, 127
133, 126, 155, 156
134, 126, 125, 155
135, 155, 125, 154
136, 154, 125, 124
137, 153, 124, 123



```
138, 152, 123, 122
139, 151, 122, 121
140, 150, 121, 120
141, 149, 120, 119
142, 148, 119, 118
143, 147, 118, 117
144, 146, 117, 116
145, 145, 116, 115
146, 144, 115, 114
147, 143, 114, 113
148, 112, 143, 113
149, 143, 144, 114
150, 144, 145, 115
**省略 151～303 单元
304, 303, 304, 285
*End Part
**完成 Bear 部件的创建
**
**提示进入装配功能模块
** ASSEMBLY
**创建装配实例
**
*Assembly, name=Assembly
**
**导入部件实例：Base
*Instance, name=Base-1, part=Base
*End Instance
**
*Instance, name=Bear-1, part=Bear
 0.,23.75, 55.
*End Instance
**
*Instance, name=Axis-1, part=Axis
 0.,0., 55.
*End Instance
**
**创建 Set-BC 结点集，包含了将要施加固定约束的结点
*Nset, nset=Set-BC, instance=Base-1
31,32,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,612,613,614,615
616,617,618,619,620,621,622,623,624,625,626,627,628,629,630,631
632,633,634,635,636,637,638,639,640,641,696,697,698,699,700,701
702,703,704,705,706,707,708,709,710,711,712,713,714,715,716,717
718,719,720,721,722,723,724,725,750,751,752,753,754,755,756,757
758,759,760,761,762,763,764,765,766,767,768,769,770,771,772,773
774,775,776,777,778,779,780,781,782,783,784,785,786,787,788,789
790,791,792,793,794,795,796,797,798,799,800,801,802,803,804,805
806,807,808,809,810,811,812,813,814,815,816,817,818,819,820,821
```

```
822,823,824,825,826,827,828,829,830,831,832,833,834,835,836,837
838,839,840,841,842,843,844,845,846,847,848,849,850,851,852,853
854,855,856,857,858,859,860,861,862,863,864,865,866,867,868,869
870,871,872,873,874,875,876,877,878,879,880,881,882,883,884,885
886,887,888,889,890,891,892,893,894,895,896,897,898,899,900,901
902,903,904,905,906,907,908,909,910,911,912,913,914,915,916,917
918,919,920,921,922,923,924,925,
**省略结点号
4000, 4001, 4002, 4003, 4004, 4005, 4006
 4007, 4008, 4009, 4010, 4011, 4012, 4013, 4014, 4015, 4016, 4017, 4018, 4019, 4020, 4021, 4022
 4023, 4024, 4025, 4026, 4027, 4028, 4029, 4030, 4031, 4032, 4033, 4616, 4617, 4618, 4619, 4620
 4621, 4622, 4623, 4624, 4625, 4626, 4627, 4628, 4629, 4630, 4631, 4632, 4633, 4634, 4635, 4636
 4637, 4638, 4639, 4640, 4641, 4642, 4643, 4644, 4645, 4646, 4647, 4648, 4649, 4650, 4651, 4652
 4653, 4654, 4655, 4656, 4657, 4658, 4659, 4660, 4661, 4662, 4663, 4664, 4665, 4666, 4667, 4668
 4669, 4670, 4671, 4672, 4673, 4674, 4675, 4676, 4677, 4678, 4679, 4680, 4681, 4682, 4683, 4684
 4685, 4686, 4687, 4688, 4689, 4690, 4691, 4692, 4693, 4694, 4695, 4696, 4697, 4698, 4699, 4700
 4701, 4702, 4703, 4704, 4705, 4706, 4707, 4708, 4709, 4710, 4711
**创建 Set-BC 单元集，包含了将要施加固定约束的单元
*Elset, elset=Set-BC, instance=Base-1
 1922, 1931, 1938, 1939, 1956, 1958, 1961, 1967, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011
 2014, 2015, 2016, 2017, 2020, 2023, 2024, 2026, 2029, 2031, 2033, 2037, 2038, 2041, 2042, 2043
 2518, 2519, 2536, 2539, 2540, 2541, 2547, 2563, 2576, 2599, 2600, 2601, 2602, 2605, 2606, 2608
 2610, 2612, 2613, 2615, 2616, 2617, 2618, 2620, 2623, 2624, 2633, 2635, 2636, 2638, 2639, 2640
 2724, 2733, 2740, 2741, 2758, 2760, 2763, 2769, 2804, 2806, 2807, 2808, 2809, 2810, 2811, 2813
 2816, 2817, 2818, 2819, 2822, 2825, 2826, 2828, 2831, 2833, 2835, 2839, 2840, 2843, 2844, 2845
**省略单元号
 7251, 7252, 7253, 7254, 7255, 7256, 7257
 7258, 7259, 7260, 7261, 7262, 7263, 7264, 7265, 7266, 7267, 7268, 7269, 7270, 7271, 7272, 7273
 7274, 7275, 7276, 7277, 7278, 7279, 7280, 7281, 7282, 7283, 7284, 7285, 7286, 7287, 7288, 7289
 7290, 7291, 7292, 7293, 7294, 7295, 7296, 7297, 7298, 7299, 7300, 7301, 7302, 7303, 7304, 7305
 7306, 7307, 7308, 7309, 7310, 7311, 7312, 7313, 7314, 7315, 7316, 7317, 7318, 7319, 7320, 7321
 7322, 7323, 7324, 7325, 7326, 7327, 7328, 7329, 7330, 7331, 7332, 7333, 7334, 7335, 7336, 7337
 7338, 7339, 7340, 7341, 7342, 7343, 7344, 7345, 7346, 7347, 7348, 7349, 7350, 7351, 7352, 7353
 7354, 7355, 7356, 7357, 7358, 7359, 7360, 7361, 7362, 7363, 7364, 7365, 7366, 7367, 7368, 7369
 7370, 7371, 7372, 7373, 7374, 7375, 7376, 7377, 7378, 7379, 7380, 7381, 7382, 7383, 7384, 7385
 7386, 7387, 7388, 7389, 7390, 7391, 7392, 7393, 7394, 7395, 7396, 7397, 7398, 7399, 7400, 7401
 7402, 7403, 7404, 7405, 7406, 7407, 7408, 7409, 7410, 7411, 7412, 7413, 7414, 7415, 7416, 7417
 7418, 7419, 7420, 7421, 7422, 7423, 7424, 7425, 7426, 7427, 7428, 7429, 7430, 7431, 7432, 7433
 7434, 7435, 7436, 7437, 7438, 7439, 7440, 7441, 7442, 7443, 7444, 7445, 7446, 7447, 7448, 7449
 7450, 7451, 7452, 7453, 7454, 7455, 7456, 7457, 7458, 7459, 7460, 7461, 7462, 7463, 7464, 7465
 7466, 7467, 7468, 7469, 7470, 7471, 7472, 7473, 7474, 7475, 7476, 7477, 7478, 7479, 7480, 7481
 7482, 7483, 7484, 7485, 7486, 7487, 7488, 7489, 7490, 7491, 7492, 7493, 7494, 7495, 7496, 7497
 7498, 7499, 7500, 7501, 7502, 7503, 7504, 7505, 7506, 7507, 7508, 7509, 7510, 7511, 7512, 7513
 7514, 7515, 7516, 7517, 7518, 7519, 7520, 7521, 7522, 7523, 7524, 7525, 7526, 7527, 7528, 7529
 7530, 7531
**
**创建 Surf-Gravity 表面，包含要施加重力载荷的面
```



```
**
*Elset, elset=_Surf-Gravity_S6, internal, instance=Base-1
268,284,285,287,330,335,353,356,557,903, 1249, 1595
*Elset, elset=_Surf-Gravity_S3, internal, instance=Base-1
298,364,365,417,419,558,579,904,925, 1250, 1271, 1596, 1617
*Elset, elset=_Surf-Gravity_S4, internal, instance=Base-1
404,407,547,553,554,565,567,893,899,900,911,913, 1239, 1245, 1246, 1257
 1259, 1585, 1591, 1592, 1603, 1605
*Elset, elset=_Surf-Gravity_S5, internal, instance=Base-1
408,411,412,416,418,426,548,549,550,551,555,556,564,568,569,570
894,895,896,897,901,902,910,914,915,916, 1240, 1241, 1242, 1243, 1247, 1248
 1256, 1260, 1261, 1262, 1586, 1587, 1588, 1589, 1593, 1594, 1602, 1606, 1607, 1608
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-Gravity
_Surf-Gravity_S6, S6
_Surf-Gravity_S3, S3
_Surf-Gravity_S4, S4
_Surf-Gravity_S5, S5
**
**创建 Surf-Push 表面，包含要施加推力载荷的面
**
*Elset, elset=_Surf-Push_S1, internal, instance=Base-1, generate
 534,581, 1
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-Push
_Surf-Push_S1, S1
** Constraint: DISP_AX
*Display Body, instance=Axis-1
Base-1.22,Base-1.16,Base-1.13
** Constraint: DISP_BEAR
*Display Body, instance=Bear-1
Base-1.22,Base-1.16,Base-1.13
*End Assembly
**
**完成装配
**
**提示进入材料属性定义
**
** MATERIALS
**
**创建材料，名称为 Steel，弹性材料，定义弹性模量为 210000，泊松比为 0.3
**
*Material, name=Steel
*Elastic
210000., 0.3
** ----------------------------------------------------------------
**
**提示进入分析步模块，选择的分析类型为通用静态分析
**
```

```
** STEP: Static
**
**创建分析步，类型为静态分析，名称为 Static
**
*Step, name=Static
**
**编辑 Static 分析步
**
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
**
**
**编辑边界条件，选择固定约束
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-Fixed Type: 对称/反对称/完全固定
**
**为 Set-BC 集施加固定约束
**
*Boundary
Set-BC, ENCASTRE
**
**提示进入载荷模块
**
** LOADS
**
**定义 Press-Gravity 载荷，大小为 50，类型为 Pressure
**
** Name: Press-GravityType: Pressure
*Dsload
Surf-Gravity, P, 50.
** Name: Press-PushType: Pressure
**
**定义 Press-Push 载荷，大小为 50，类型为 Pressure
**
*Dsload
Surf-Push, P, 10.
**
**进入输出请求设置
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**定义场变量输出请求
```

```
**
**列出的场变量将被输出结果
*Output, field
*Element Output, directions=YES
ALPHA, ALPHAN, CS11, CTSHR, E, EE, ER, IE, LE, MISES, MISESMAX, MISESONLY, NE, PE, PEEQ, PEEQMAX
PEEQT, PEMAG, PEQC, PRESSONLY, PS, S, SALPHA, SE, SEE, SEP, SEPE, SPE, SSAVG, THE, TRIAX, TSHR
VE, VEEQ, VS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
**
** 定义历史变量输出请求
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
**分析步结束
```

10.4 本章小结

线性静力学问题很容易求解，因此用户更关心的是计算精度和求解效率。其关键点是网格的划分，包括种子的设置、网格控制和单元类型的选取。

第 11 章　非线性分析

ABAQUS 可以对复杂的结构力学系统进行分析，尤其在庞大复杂问题以及对高度非线性问题的模拟方面有比较好的解决。本章主要针对力学模拟中的几何、材料两种非线性问题进行讨论，重点论述如何在 ABAQUS 中求解这两种非线性问题。

本章学习目标

- 掌握非线性分析的概念
- 掌握非线性问题的分类方法
- 掌握非线性问题求解基本理论
- 掌握不同类型非线性问题的求解方法

11.1　非线性问题概述

线性分析是对事物物理本质的一种近似描述，对于绝大多数问题来说，线性分析是不能够解决问题的。非线性问题在日常生活中更为普遍，这就需要我们掌握非线性分析方法。非线性分析本身很复杂，一是对问题的描述复杂，例如对材料非线性性质的描述（如怎样正确选用某些指标来定义材料的损伤、失效，由于要得到材料的真实本构关系很困难，正确地表述也存在难度），对非线性过程的描述（如接触分离现象）；二是求解非线性方程的过程复杂，例如求解稳定问题时用到的弧长法等。

11.1.1　线性与非线性

■ 线性分析

到目前为止所讨论的分析实例均为线性情形，也就是施加的载荷和系统响应间存在线性关系。

例如：如果一线性弹簧在 10N 的载荷下伸长 1m，那么施加 20N 的载荷就会伸长 2m。这意味着在线性分析中，结构的柔度阵只需计算一次（将刚度阵集成并求逆即可得到）。其他载荷情形下，结构的线性响应可通过将新的载荷向量与刚度阵的逆相乘得到。

此外，结构对不同载荷情形的响应，可以通过用常数进行比例变换或相互叠加的方式，来得到结构对新载荷的响应。这就要求新载荷是先前各载荷的线性组合。载荷的叠加原则假定所有的载荷的边界条件相同。

ABAQUS 在线性动力学模拟中使用了载荷的叠加原理，这将在后面的章节进行讨论。

■ 非线性分析

结构的非线性问题指结构的刚度随其变形而改变的问题。实际上所有的物理结构均为非线性的，而线性分析只是一种方便的近似。显然，线性分析对包括加工过程的许多结构模拟来说是不够的，例如锻造或冲压、压溃分析、橡胶部件、轮胎和发动机垫圈分析等问题。一

个简单的例子就是具有非线性刚度响应的弹簧，如图 11-1 所示。

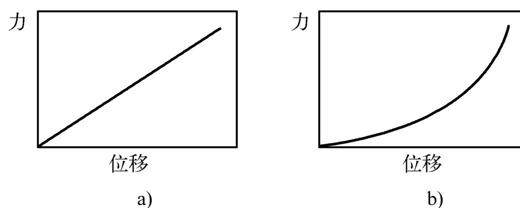


图 11-1 线性和非线性弹簧特性

a) 线性弹簧，刚度是常数 b) 非线性弹簧，刚度不是常数

对于非线性问题由于刚度依赖于位移，所以不能再用初始柔度乘以所施加的载荷的方法来计算任意载荷时弹簧的位移了。在非线性分析中结构的刚度阵在分析过程中必须进行许多次的生成、求逆，这使得非线性分析求解比线性分析耗时多得多。

由于非线性系统的响应不是所施加载荷的线性函数，因此不可能通过叠加来获得不同载荷的解。每种载荷都必须作为独立的分析进行定义及求解。

在日常生活中，经常会遇到非线性结构。例如，当用钉书机装订书时，金属订书针将永久地弯曲成一个不同的形状，如图 11-2a 所示；如果在一个木架上放置重物，随着时间的流逝，木架的弯曲变形将越来越大，如图 11-2b 所示；当向汽车或卡车上装货时，它的轮胎和路面间的接触将随货物重量的变化而变化，如图 11-2c 所示。如果将上面例子的载荷－变形曲线画出来，我们将发现它们都显示了非线性结构的基本特征——变化的结构刚度。

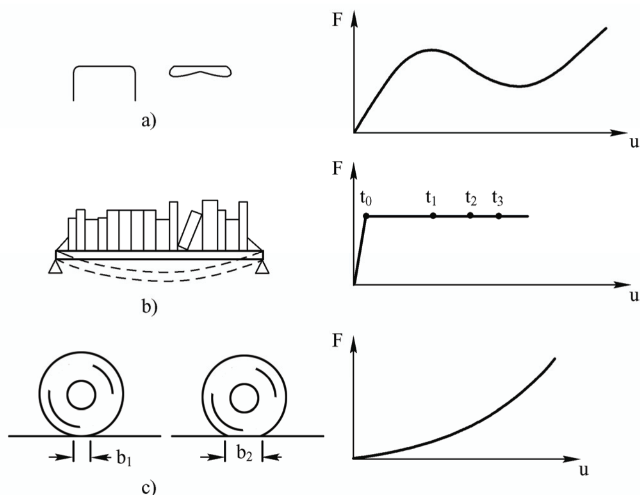


图 11-2 非线性示例

a) 钉书针 b) 木架 c) 轮胎

11.1.2 非线性的来源

■ 材料非线性

大多数金属在小应变时都具有良好的线性应力—应变关系，但在应变较大时，材料会发生屈服，此时材料的响应变成了非线性和不可逆的，如图 11-3 所示。这种非线性是人们较

为熟悉的一种非线性问题。

橡胶可以近似认为是具有非线性的、可逆（弹性）响应的材料，如图 11-4 所示。

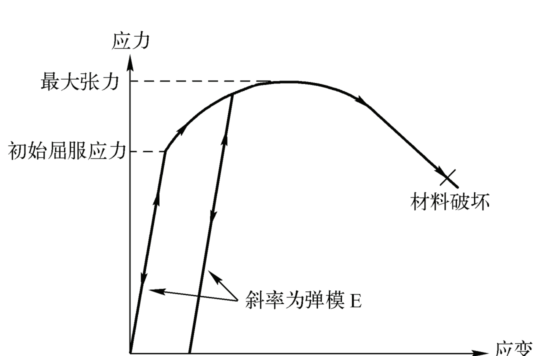


图 11-3　弹塑性材料轴向拉伸应力-应变曲线

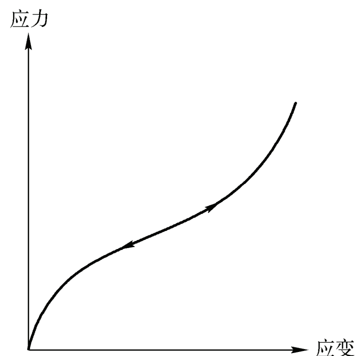


图 11-4　橡胶类材料应力-应变曲线

材料的非线性也可能与应变以外的其他因素有关。应变率相关材料的材料参数和材料失效都是材料非线性的表现形式。材料性质也可以是温度和其他预先设定的场变量的函数。

■ 几何非线性

几何非线性发生在结构位移的大小影响到结构响应的情形。这可能由于以下几种原因：

- 大挠度或转动
- “突然翻转”
- 初应力或载荷硬化

例如，端部受竖向载荷的悬臂梁，如图 11-5 所示。若端部挠度较小，分析时可以认为是近似线性的。然而若端部的挠度较大，结构的形状乃至于其刚度都会发生改变。另外，若载荷不能保持与梁垂直，载荷对结构的作用将发生明显的改变。当悬臂梁自由端部挠曲时，载荷可以分解为一个垂直于梁的分量和另一个沿梁的长度方向作用的分量。所有这些效应都会对悬臂梁的非线性响应产生影响（也就是梁的刚度随它所承受载荷的增加而不断变化）。

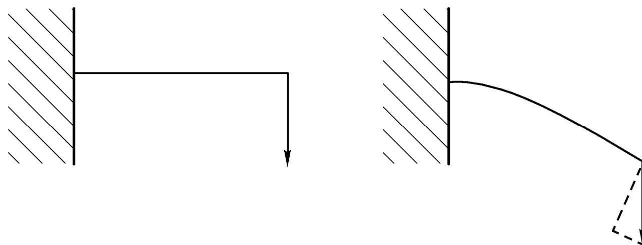


图 11-5　悬臂梁的大挠度

可以预料大挠度和转动对结构承载方式有重要影响。然而，并非位移相对于结构尺寸很大时，几何非线性才显得重要。例如，一块很大的平板在所受压力下的“突然翻转”现象，如图 11-6 所示。

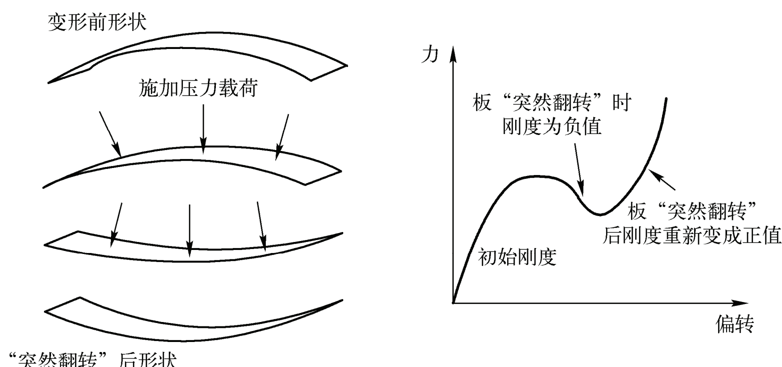


图 11-6　大平板的突然翻转

在此例中板的刚度在变形时会产生戏剧性的变化。当平板突然翻转时，刚度就变成了负的。这样，尽管位移的量值相对于板的尺寸来说很小，在模拟分析中仍有严重的几何非线性效应，这是必须加以考虑的。

此时，只需对模型做些小的修改就可以将几何非线性效应包含于分析中。

首先要在定义分析步时考虑几何非线性效应，要给出分析步中允许的最大增量步的数目。如果 ABAQUS 需要比此数目更多的增量步来完成分析，它将中止分析并给出出错信息。

分析步中默认的增量步数是 100，但如果题目有显著的非线性，可能会需要更多的增量步。用户给出的增量步数目是 ABAQUS 可以采用的增量步数的上限，而不是它所必须使用的增量步数。

在非线性分析中，一个分析步是发生于一段有限的"时间"内的。除非该问题中惯性效应或率相关效应是重要因素，否则这里的"时间"并没有物理含义。

用户是在这个理解背景下指定初始时间增量$\Delta T_{initial}$和此分析步的总时间ΔT_{total}的。这些数据也指定了第一个增量步中所施加的载荷的比例。初始载荷增量的计算见式（11-1）。

$$初始载荷增量=\frac{\Delta T_{initial}}{\Delta T_{total}}\times 载荷值 \qquad (11-1)$$

初始时间增量的选择对于某些非线性模拟计算可能会很关键。但对大多数分析来说，初始时间增量的大小介于总分析步时间的 5%～10%之间通常是足够的，除非模型中包含率相关材料效应或阻尼器等情况。在静态模拟计算时，为了方便，总分析步时间通常均置为 1.0。当总分析步时间为 1.0 时，所施加载荷的比例总是等于当前的时间步大小，也就是当时间步为 0.5 时施加的载荷就是总载荷的 50%。

初始增量大小必须指定，但后面的增量大小却由 ABAQUS 自动控制。尽管也可以对增量大小进行进一步的人工控制，但 ABAQUS 的自动控制对于大多数非线性模拟计算来说是适合的。

如果收敛性问题造成过多的增量减小，使得增量值降到了最小值以下，ABAQUS 就会中止分析。默认的最小容许时间增量ΔT_{min}为10^{-5}乘以总分析步时间。

除了总分析步时间的限制外，ABAQUS 对最大时间增量ΔT_{max}没有默认的上界限制。用户也可以根据 ABAQUS 模拟计算的实际情况，指定不同的最小和/或最大容许的增量大小。

如果知道模拟计算在所加载荷过大时，求解会出现问题（例如模型在大载荷时会经历塑性变形），为了减小ΔT_{max}，此时就可以指定最大容许增量步。

在几何非线性分析中，局部的材料方向在每个单元中可能随变形而转动。对于壳、梁及桁架单元，局部的材料方向总是随变形而转动的。

对于实体单元，仅当单元参照非默认的局部材料方向时，局部材料方向才随变形而转动，而在默认情况下局部材料方向在整个分析中将始终保持不变。

在结点上定义的局部方向在整个分析中始终保持不变，不随变形而转动。详细情况请参阅帮助文档的相关章节。

一旦在一个分析步中包括几何非线性，所有的后继分析步中都会自动考虑几何非线性。如果在一个后继分析步中没有要求几何非线性，ABAQUS 会发出警告信息并声明仍然包括几何非线性。

模型的大变形并不是唯一的重要几何非线性效应。ABAQUS 中刚度矩阵的计算也包括由于施加载荷引起的单元刚度项（称为载荷刚度）的计算，这些项能改善计算的收敛情况。另外，壳的薄膜载荷、缆索和梁的轴向载荷都对结构在横向载荷响应的刚度产生很大影响。所以在考虑几何非线性时，这种由于横向载荷对薄膜刚度的影响应该考虑在内。

■ 边界非线性

若边界条件随分析过程发生变化，就会产生边界非线性问题。如图 11-7 所示的悬臂梁，它随施加的载荷发生挠曲，直至碰到障碍。

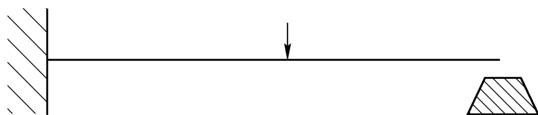


图 11-7　将碰到障碍物的悬臂梁

梁端部的竖向挠度与载荷在它接触到障碍以前是线性关系。在端部碰到障碍后梁端部的边界条件发生突然的变化，阻止竖向挠度继续增大，因此梁的响应将不再是线性的。边界非线性是极度不连续的，在模拟分析中发生接触时，结构的响应特性会在瞬时发生很大的变化。

另一个边界非线性的例子是将板材材料冲压入模具的过程。在与模具接触前，板材在压力下的伸展变形是相对容易产生的，在与模具接触后，由于边界条件的改变，必须增加压力才能使板材继续成型。

边界非线性问题是 ABAQUS 一个非常重要的应用领域，本书将在第 13 章接触问题详细介绍。

11.1.3 非线性问题求解方法

用户在使用 ABAQUS 进行一般的非线性问题求解时，并不会接触到 ABAQUS 的理论模型。但是，对 ABAQUS 处理非线性问题的理论与方法有一定的了解对用户深入理解有限元方法、ABAQUS 求解过程有重要的作用。如果求解出现问题，对求解理论有一定的了

解，能迅速找到问题症结所在，对于实际项目的分析可以提高效率与求解精确度。

图 11-8 所示为结构的非线性载荷—位移曲线。ABAQUS 使用 Newton-Raphson 法来求解非线性问题。在非线性分析中的求解不能像线性问题中那样，只求解一组方程即可，而是逐步施加给定的载荷，以增量形式趋于最终解。

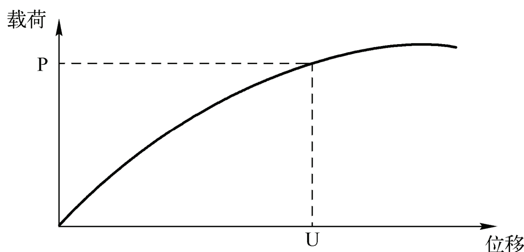


图 11-8 非线性载荷—位移曲线

因此 ABAQUS 将计算过程分为许多载荷增量步，并在每个载荷增量步结束时寻求近似的平衡构形。ABAQUS 通常要经过若干次迭代才能找到某一载荷增量步的可接受的解。所有增量响应的和就是非线性分析的近似解。

例如图 11-9 中，作用在物体上的外部作用力 P 和内部（结点）作用力 I。作用于一结点上的内部作用力是由包含此结点的各单元中的应力引起的。为了使物体处于平衡状态，每个结点上施加的净作用力必须为零。因此平衡的基本判据为内部作用力 I 和外部作用力 P 必须互相平衡：

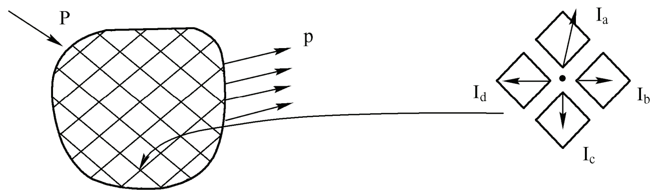


图 11-9 物体上的外部载荷和内部作用力

$$P-I=0 \quad (11-2)$$

本节将引入一些新概念来描述分析中的不同组成部分。清楚地理解分析步，载荷增量步和迭代步的区别是很重要的。

模拟计算的加载过程包含单个或多个步骤，所以要定义分析步。它一般包含分析过程选择，载荷选择和输出要求选择。而且每个分析步都可以采用不同的载荷、边界条件、分析过程和输出要求。以板材变形为例说明：

- 步骤一：将板材夹于刚性夹具上。
- 步骤二：加载使板材变形。
- 步骤三：确定变形板材的自然频率。

增量步是分析步的一部分。在非线性分析中，一个分析步中施加的总载荷被分解为许多小的增量，这样就可以按照非线性求解步骤来进行计算。

当提出初始增量的大小后，ABAQUS 会自动选择后继的增量大小。每个增量步结

束时，结构处于（近似）平衡状态，结果可以写入输出数据库文件、重启动文件、数据文件或结果文件中。选择某一增量步的计算结果写入输出数据库文件的数据称为帧（frames）。

迭代步是在一增量步中找到平衡解的一种尝试。如果模型在迭代结束时不是处于平衡状态，ABAQUS 将进行另一轮迭代。

随着每一次迭代，ABAQUS 得到的解将更接近平衡状态；有时 ABAQUS 需要进行许多次迭代才能得到一平衡解。当平衡解得到以后一个增量步才完成，即结果只能在一个增量步的末尾才能获得。

结构对于一个小的载荷增量ΔP 的非线性响应示如图 11-10 所示。ABAQUS 利用基于 U_0 时的结构初始刚度 K_0，和增量ΔP 来计算结构的位移修正值 c_a。利用 c_a 将结构的构形更新为 U_a。

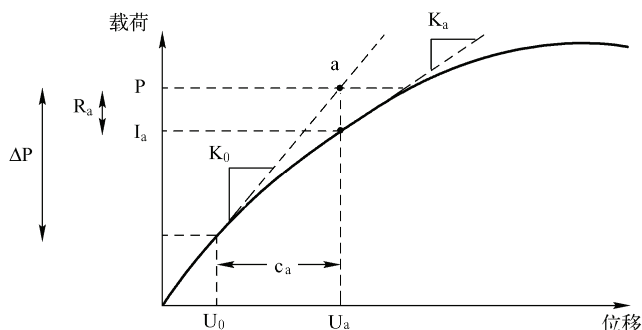


图 11-10 一增量步中的首次迭代

基于结构新的构形 U_a，ABAQUS 形成新的刚度 K_a。利用 K_a 来计算更新后的构形中结构的内部作用力 I_a。所施加的总载荷 P 和 I_a 的差值可计算如下：

$$R_a=P-I_a \tag{11-3}$$

式中：R_a——迭代的作用力残差值。

如果 R_a 在模型的每一自由度上均为零，图 11-10 中的 a 点将位于载荷-位移曲线上，结构将处于平衡状态。在非线性问题中，几乎不可能使 R_a 等于零，因此 ABAQUS 将 R_a 与容许残差进行比较。

如果 R_a 比作用力容许残差小，ABAQUS 就接受结构的更新构形作为平衡结果。默认的容许残差设置为结构中对时间进行平均的作用力的 0.5%。ABAQUS 在整个模拟过程中自动从空间分布和对时间平均的角度计算该值。

若 R_a 比目前的容许残差小，就认为 P 和 I_a 处于平衡状态，U_a 就是结构在当前载荷下合理的平衡构形。而 ABAQUS 在接受此解前，还要检查位移修正值 c_a 与总的增量位移 $\Delta U_a=U_a-U_0$ 相比是否更小。若 c_a 大于增量位移的 1%，ABAQUS 将重新进行迭代。只有这两个收敛性检查都得到满足，才认为此载荷增量下的解是收敛的。

上述收敛判断规则有一个例外，即线性增量情况。线性增量的定义是指增量步内最大的力残差小于时间平均力乘以 10^{-8} 的增量步，凡严格满足这个定义的增量步无需再进行迭代，无需进行任何检查即可认为其解是可接受的。

若迭代结果不收敛，ABAQUS 将进行另一种迭代以使内部和外部作用力达到平衡，如图 11-11 所示。第二种迭代采用前面迭代结束时计算得到的刚度 K_a 和 R_a 一起来确定另一位移修正值 c_a，这使得系统更加接近平衡状态。

ABAQUS 利用结构新构形 U_b 中的内部作用力计算新的作用力残值 R_b，再次将任意自由度上的最大作用力残值与作用力残值容许值进行比较，将第二种迭代的位移修正值 c_b 与增量位移 $\Delta U_b=U_b-U_0$ 进行比较。如果需要的话 ABAQUS 将进行进一步的迭代。

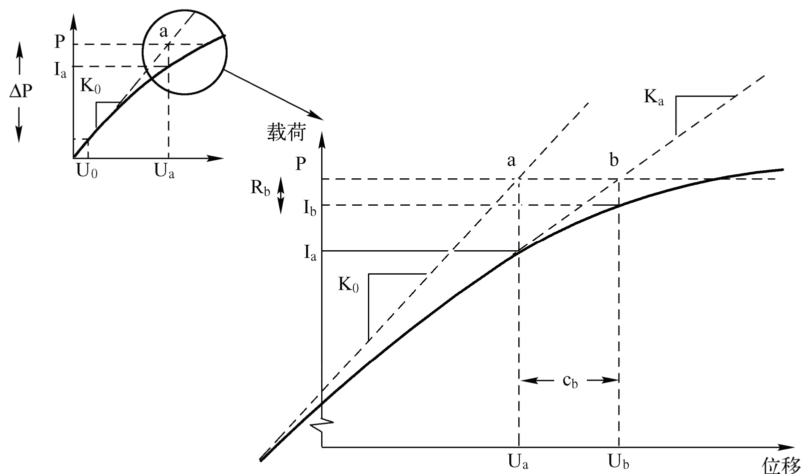


图 11-11 第二种迭代

对于非线性分析中的每次迭代，ABAQUS 要重新形成模型的刚度矩阵并求解方程组。从计算耗时的角度来说，这意味着每次迭代等价于进行一次完整的线性分析。现在可以清楚地看到非线性分析的计算耗时可能要比线性问题大许多倍。

可以在每一收敛的增量步上保存结果，所以非线性模拟计算中得到的输出数据量将是线性分析中可得到数据量的很多倍。因此在规划计算机资源时，就应考虑这些因素及计划选择的非线性模拟计算的类型。

ABAQUS 自动调整载荷增量步的大小，因此它能便捷而有效地求解非线性问题。用户只需在每个分析步计算中给出第一个增量的大小，ABAQUS 会自动调整后续增量的大小。

若用户未提供初始增量大小，ABAQUS 会试图将该分析步的全部载荷都作为第一增量步载荷来施加，这样在高度非线性的问题中 ABAQUS 不得不反复减小增量大小，从而导致 CPU 时间的浪费。

一般来说，提供一个合理的初始增量大小是很必要的；只有在很平缓的非线性问题中才可能将一分析步中的所有载荷施加于一个增量步中。

在一个载荷增量里得到收敛解所需的迭代步数会随系统的非线性程度而变化。默认情况下，如果在 16 次迭代中仍不收敛或出现发散，ABAQUS 会放弃当前增量步，并将增量大小置为先前值的 25%，重新开始计算，即利用比较小的载荷增量来尝试找到收敛的解。

若此增量仍不收敛，ABAQUS 将再次减小增量大小。ABAQUS 允许一增量步中最多有 5 次增量减小，否则就会中止分析。

如果增量步的解在少于 5 次迭代时就收敛，这表明找到解答相对很容易。因此如果连续两个增量步只需少于 5 次的迭代就可以得到收敛解，ABAQUS 会自动将增量大小提高 50%。

11.2　非线性问题实例

本节将结合实例介绍在 ABAQUS 中进行非线性问题分析的方法。在本节将要介绍的是几何非线性与材料非线性问题，对于边界非线性即接触问题，将在后面有专门章节进行讨论。

11.2.1　几何非线性问题——薄板的大变形

本节将分析一个线性材料的薄板由于发生大尺度变形而导致非线性的问题。如图 11-12 所示为一个平板，该板与整体 1 轴的夹角为 30°，一端固定，另一端被限制在轨道上仅能沿平行于平板的轴向移动。该斜板是各向同性线弹性材料，其弹性模量$\Delta U_a=U_a-E=30\times10^9$Pa，泊松比 v=0.3。

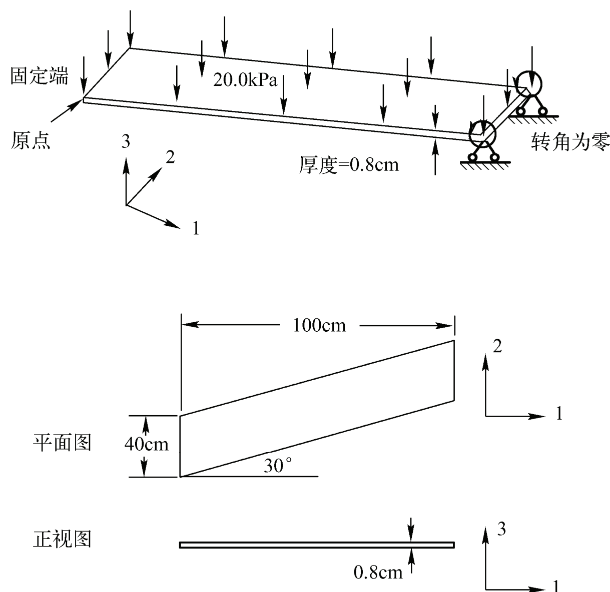


图 11-12　斜板示意图

在开始建模以前，先确定量纲系统。题目给的长度单位为 cm，荷载单位为 MPa，材料属性单位为 GPa。由于它们在量纲上不匹配，必须予以统一，并在输入数据上得到体现。我们在以下论述中采用牛顿、米、千克和秒的量纲系统。

（1）启动 ABAQUS/CAE，进入“部件”模块。单击按钮，弹出图 11-13 所示的“创建部件”对话框。选择“三维”模型空间，基本特征为“壳”，类型为“平面”，单击“继续”，绘制图 11-14 所示的草图。



图 11-13 “创建部件”对话框

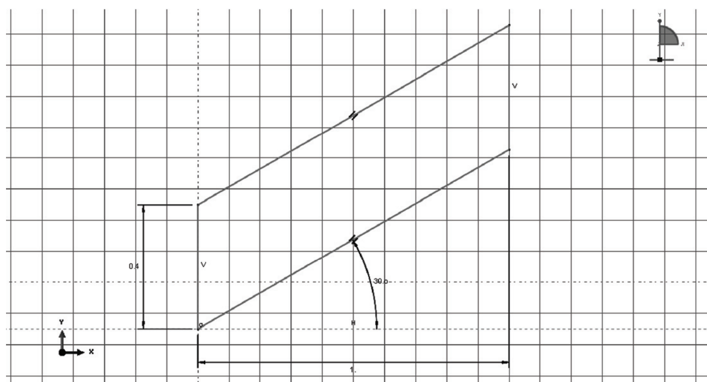


图 11-14 斜板草图

单击提示区中的“完成”按钮，得到薄板模型如图 11-15。

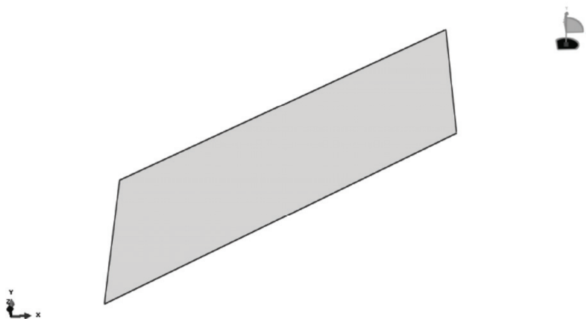


图 11-15 薄板模型

用户也可以在“关键字编辑器”中使用*Node 命令来创建模型，直接生成单元，没有几何模型，结点的定义格式为“结点号，X 坐标，Y 坐标，Z 坐标”。然后使用如下方法定义单元。

*Element, type=S8R5

单元的定义格式为“单元号，结点号，结点号……结点号”，其中结点号为组成本单元的结点的编号。

（2）进入“属性”模块，开始定义材料特性。单击按钮，弹出图 11-16 所示的“编辑材料”对话框，选择弹性材料，保持默认设置，输入名称为“Steel”，输入杨氏模量为“30e9”，泊松比为“0.3”，单击“确定”完成材料创建。

在 INP 中也可以设置壳截面的参数：指定义指派对象、材料、局部坐标（材料方向）。例如：

```
*Shell Section, elset=Set-3, material=Steel, orientation=Ori-1
```

也可以直接创建材料：

```
*Material, name=Steel
*Elastic
 3e+10, 0.3
```

（3）单击按钮，弹出图 11-17 所示的“创建截面”对话框，选择类别为“壳”，“类型”为“均质”，单击“继续”。



图 11-16 “编辑材料”对话框

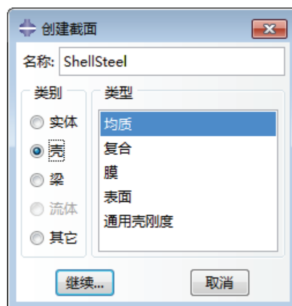


图 11-17 “创建截面”对话框

在弹出的图 11-18 所示的“编辑截面”对话框中，输入厚度为“0.8E-2”，单击“确定”。

设置壳截面的参数：定义指派对象、材料、局部坐标（材料方向）。

*Shell Section, elset=Set-3, material=Steel, orientation=Ori-1

0.008, 5

（4）在整体坐标系下结构的方向如图 11-12 所示，整体笛卡儿坐标系定义了默认的材料方向，但此板相对坐标是倾斜的。

因为在材料 1 方向上的正应力σ_{11}同时受平板弯曲产生的轴向应力和平板轴线的横向剪切应力的影响，所以如使用默认的材料方向，将不容易解释模拟的结果。

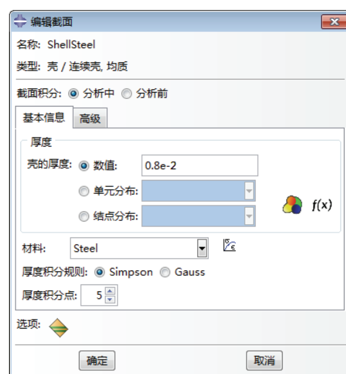


图 11-18 “编辑截面”对话框

如果材料方向与平板轴线和横切方向一致，模拟的结果极易被解释。因此，需要一个局部的直角坐标系，它的 x′ 方向沿着板的长边方向（和整体坐标系 1 轴的夹角为 30°），且 y′ 轴也在板平面内。

使用（创建基准坐标系：两条线）工具，定义一个如图 11-19 所示的基准直角坐标系。

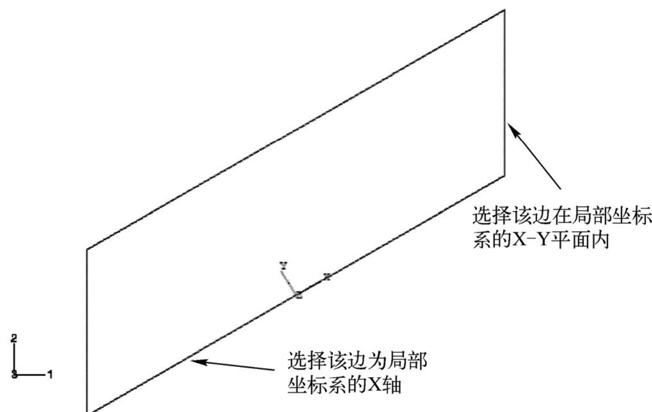


图 11-19 用于定义局部材料方向的基准坐标系

从主菜单选择“指派（Assign）→材料方向（Material Orientation）”命令，并选择整个部件作为局部材料方向的有效区域。

在视图中选择刚建立的基准坐标系，单击中键，弹出图 11-20 所示的“编辑材料方向”对话框，选择“轴 3”作为近似的壳体法线方向，无需绕此轴进行额外的旋转，单击“确定”完成设置。

为了检验局部材料方向是否正确，可使用询问材料方向。

一旦部件被剖分网格，则模型中的单元生成和所有的单元变量都定义在这个局部坐标系下。

使用 INP 文件命令定义则非常简单，定义好名称后，直接输入结点坐标与方向即可。

```
**定义局部坐标系
*Orientation, name=Ori-1
0.866025403784439, 0.5,0.,-0.5, 0.866025403784439,0.
3, 0.
```

（5）单击按钮，拾取上一步创建的壳，单击中键，弹出图 11-21 所示“编辑截面指派”对话框。单击“确定”完成截面指派。

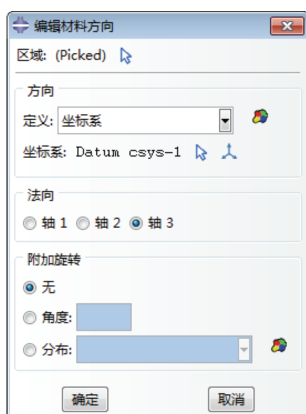


图 11-20 “编辑材料方向”对话框



图 11-21 “编辑截面指派”对话框

（6）进入装配模块，单击按钮，弹出图 11-22 所示的“创建实例”对话框，选择“Plate”部件，单击“确定”完成实例化。

（7）单击按钮，拾取两条长边的中点，将模型分区如图 11-23 所示。

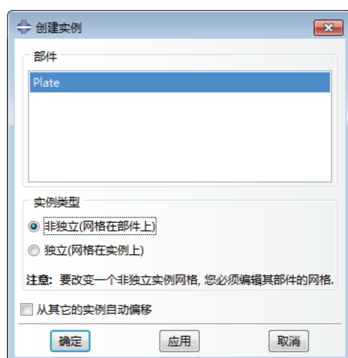


图 11-22 “创建实例”对话框

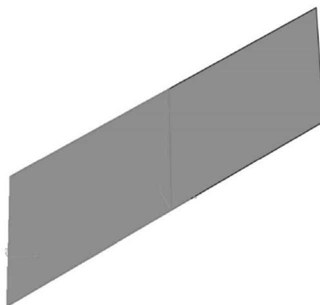


图 11-23 模型分区

（8）选择菜单栏中的“工具（Tools）→集（Set）→创建（Create）”为板的中部创建一个名为 MidSpan 的集。类似地，生成板的左部和右部集，相应地命名为 EndA 和 EndB。

用户也可以在“关键字编辑器”中，直接输入，即可定义。

```
*Nset, nset=MidSpan, instance=Plate-1
1,2,7,8,9, 66, 70, 73, 76
*Elset, elset=MidSpan, instance=Plate-1
1,2,3,4, 25, 26, 27, 28
```

要注意同时定义结点与单元。

创建集与表面在界面中的操作基本相同，但在命令中有较大的区别，例如：

```
*Elset, elset=_Surf-1_SPOS, internal, instance=Plate-1, generate
1,48,1
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-1
_Surf-1_SPOS, SPOS
```

这里创建的是一个表面，不用定义结点。

（9）进入“分析步”模块，单击⊶，弹出图 11-24 所示的“创建分析步”对话框，输入分析步名称，选择通用静态分析，单击“继续”，弹出图 11-25 所示的“编辑分析步”对话框。在“几何非线性”项选择“开”，输入描述“Uniform pressure (20kPa)load”，在“增量”选项卡中修改初始增量步为“0.1”，单击“确定”完成分析步定义。

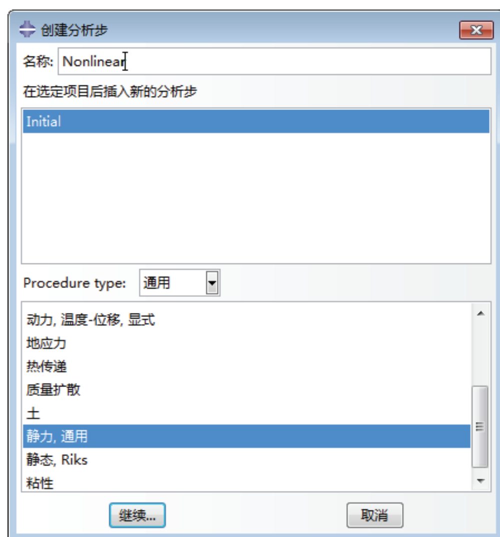


图 11-24 “创建分析步”对话框

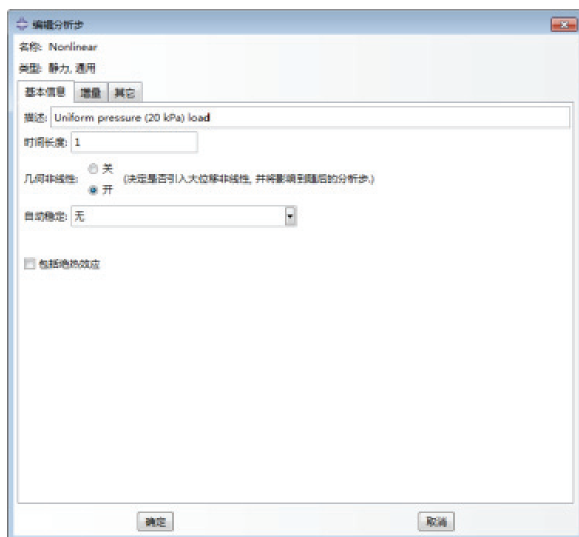


图 11-25 “编辑分析步”对话框

也可以使用命令进行定义。

```
** STEP: Nonlinear
**
*Step, name=Nonlinear, nlgeom=YES
*Static
```

0.1, 1., 1e-05, 1.

（10）板的左端完全固定，右端被限制在轨道上仅能沿平行于平板的轴向移动。由于右端边界条件的约束方向和整体坐标轴不一致，需要定义一个局部坐标系，使其轴与板走向一致。可利用前面为定义局部材料方向而创建的基准坐标系。在此之前，先转到“载荷”模块。

选择“边界条件（BC）→创建（Create）”，或单击，弹出图 11-26 所示的“创建边界条件”对话框，在“Nonlinear”分析步中定义一个名为“Rail boundary condition”的位移/转角（Displacement/ Rotation）力学边界条件。

在本例中将给集定义边界条件而不是直接给视图中选定的区域定义边界条件，因此当提示给区域指定边界条件时，要单击提示区中的“集”（Sets）。

单击“继续”按钮，再单击提示区中的“集”，从弹出的“区域选择”（Region Selection）对话框中选择集 EndB，并选中“在视口中高亮显示所选择的对象”（Highlight selections in viewport）以确保集的选择是正确的，此时板的右侧边会加亮，单击“继续”。

在图 11-27 所示的“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框中，单击指定局部坐标系，边界条件施加在此坐标系中。在视图中选择前面为定义局部材料方向而创建的基准坐标系，局部坐标系 1 方向和板的长边方向对准。



图 11-26 “创建边界条件”对话框



图 11-27 “编辑边界条件”对话框

在“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框中，选择除 U1 以外的所有自由度进行约束。

这样板的右端被限制在轨道上仅能沿平行于平板的轴向移动。一旦剖分了板的网格生成了结点，所有与这个区域相关的结点结果输出值（位移、速度和约束反力等）都是基于局部坐标系下的。

（11）单击，弹出图 11-28 所示的“创建边界条件”对话框，在“Nonlinear”分析步中定义一个名为“Fix left end”的位移/转角（Displacement/Rotation）力学边界条件。

单击“继续”，弹出图 11-29 所示的“编辑边界条件”对话框，约束所有自由度，单击

“确定”完成。使用命令则非常方便。

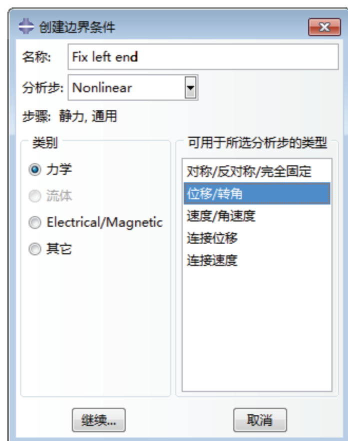


图 11-28 “创建边界条件”对话框



图 11-29 “编辑边界条件”对话框

```
** Name: Fix left end Type: 位移/转角
*Boundary
EndA, 1, 1
EndA, 2, 2
EndA, 3, 3
EndA, 4, 4
EndA, 5, 5
EndA, 6, 6
```

（12）单击按钮，弹出图 11-30 所示的“创建载荷”对话框，选择“压强”，单击“继续”，按住〈Shift〉键选择两个分区，单击中键，弹出图 11-31 所示的“编辑载荷”对话框。



图 11-30 “创建载荷”对话框



图 11-31 “编辑载荷”对话框

输入大小为“2E4”，单击“确定”完成载荷的创建。

也可以使用如下方法定义。

```
** Name: PressureType: Pressure
*Dsload
Surf-1, P, 20000.
**
```

在选择单元类型前，必须先考虑以下问题：板是薄板还是厚板？是大应变还是小应变问题？本例中由于板的厚度和最小的跨度之比为 0.02，可认为板是相当薄的（厚度为 0.8cm，最小的跨度为 40cm）。而当不能预测结构应变大小时，不妨认为是小应变情况。

基于这些信息，选用二阶壳单元（S8R5），对于薄壳在小应变分析的场合，这类单元将给出精确的结果。

有关更进一步的壳单元选择的详细信息，请参阅 ABAQUS 帮助文档的相关章节。

（13）进入“网格”（Mesh）模块，用 0.1 作为全局的单元尺寸来剖分部件。从主菜单中选择“网格（Mesh）→控制（Controls）”，弹出“网格控制属性”对话框，按图 11-32 完成设置，单击“确定”完成。

（14）单击按钮，在图 11-33 所示的“全局种子”对话框中输入全局尺寸“0.1”，单击“确定”完成布种。

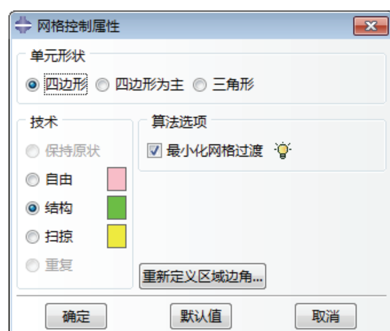


图 11-32 “网格控制属性”对话框

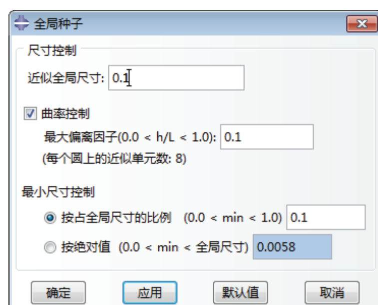


图 11-33 “全局种子”对话框

单击按钮，按住〈Shift〉键拾取两个分区，单击中键，弹出图 11-34 所示的“单元类型”对话框，选择二次壳单元，每个结点 5 自由度，单击“确定”完成。

单击，单击中键完成网格划分如图 11-35 所示。

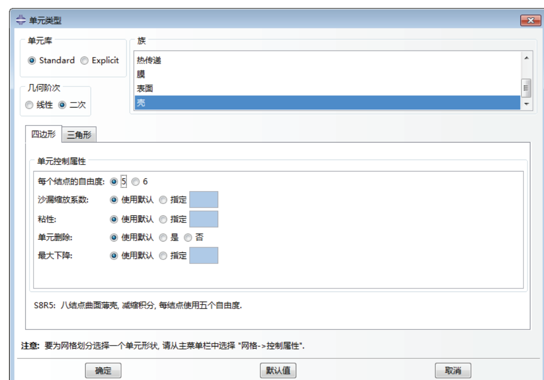


图 11-34 “单元类型”对话框

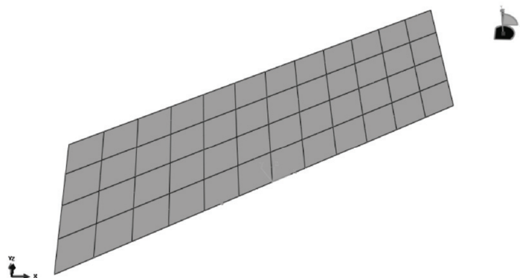


图 11-35 网格划分

（15）接下来进入“作业”（Job）模块定义一个名为“Plate”的作业。

单击![]，弹出图 11-36 所示的“创建作业”对话框，输入名称，单击“继续”，弹出图 11-37 所示的“编辑作业”对话框。单击“确定”完成作业创建。



图 11-36 “创建作业”对话框

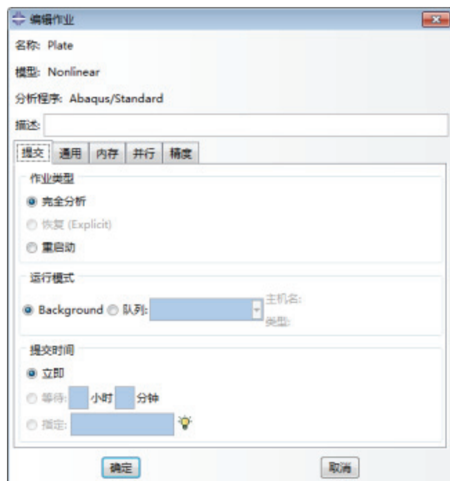


图 11-37 “编辑作业”对话框

（16）单击![]按钮，弹出图 11-38 所示的“作业管理器”对话框，选择上一步创建的作业，写入输入文件，信息区提示“作业输入文件已写入到 "Plate.inp".”。

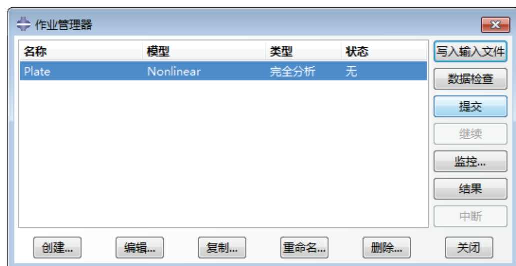


图 11-38 “作业管理器”对话框

保存模型到 ex11.2.1.cae 模型数据库文件中。

（17）单击“数据检查”按钮，直至信息区中提示如下：

“作业输入文件 "Plate.inp" 已提交分析。

Job Plate: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job Plate: Abaqus/Standard completed successfully.
Job Plate completed successfully.”

以下即在监控器中显示的信息，可以查看单元类型、输出请求等信息。

```
*Heading
*Node
*Element,type=S8R5
*Nset,nset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-1
```



```
*Nset,nset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-3
*Nset,nset=ASSEMBLY_PLATE-1__PICKEDSET4
*Elset,elset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-1
*Elset,elset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-3
*Elset,elset=ASSEMBLY_PLATE-1__PICKEDSET4
*Nset,nset="ASSEMBLY__T-Plate-1-Datumcsys-1"
*Nset,nset=ASSEMBLY_ENDA
*Nset,nset=ASSEMBLY_ENDB
*Nset,nset=ASSEMBLY_MIDSPAN
*Elset,elset=ASSEMBLY_ENDA
*Elset,elset=ASSEMBLY_ENDB
*Elset,elset=ASSEMBLY_MIDSPAN
*Elset,elset=ASSEMBLY__SURF-1_SPOS
*surface,type=ELEMENT,name=ASSEMBLY_SURF-1
*surface,type=ELEMENT,name=ASSEMBLY_SURF-1
*material,name=STEEL
*elastic
*orientation,name=ASSEMBLY_PLATE-1_ORI-1
*shellsection,elset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-3,material=STEEL,orientation=ASSEMBLY_PLATE-1_ORI-1
*transform,nset="ASSEMBLY__T-Plate-1-Datumcsys-1"
*boundary
*boundary
*shellsection,elset=ASSEMBLY_PLATE-1_SET-3,material=STEEL,orientation=ASSEMBLY_PLATE-1_ORI-1
*surface,type=ELEMENT,name=ASSEMBLY_SURF-1
*output,field,variable=PRESELECT
*output,history,variable=PRESELECT
*output,field,variable=PRESELECT
*output,history,variable=PRESELECT
*output,field,variable=PRESELECT
*output,history,variable=PRESELECT
*Step,name=Nonlinear,nlgeom=YES
*output,field,variable=PRESELECT
*output,history,variable=PRESELECT
*Step,name=Nonlinear,nlgeom=YES
*Step,name=Nonlinear,nlgeom=YES
Uniformpressure(20kPa)load
*static
*boundary
*boundary
*dsload
*output,field,variable=PRESELECT
*output,history,variable=PRESELECT
*endstep
*Step,name=Nonlinear,nlgeom=YES
*static
*boundary
```

```
*boundary
*endstep
```

至此本模型已检查成功，可以进行分析，单击“提交”按钮，完成分析。

注意，在提交作业进行分析计算并监控求解过程中，要纠正每一个由求解器发出的错误，研究每一个警告信息产生的原因。

（18）完成分析后，在监控器中可以看到迭代 6 步后完成了分析，如图 11-39 所示。

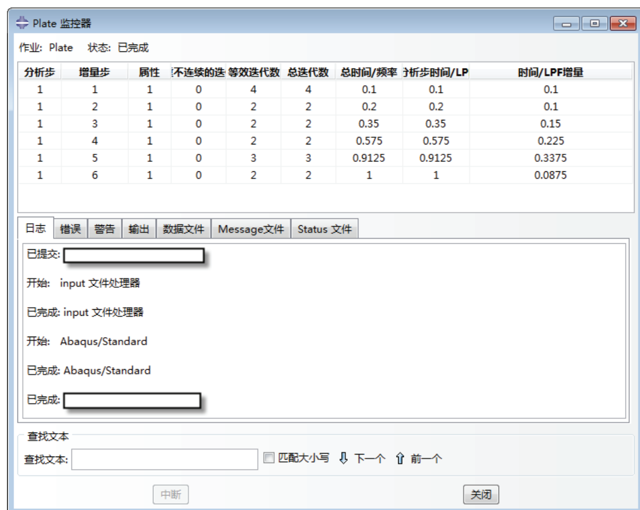


图 11-39 监控器界面

本例为读者提供了 INP 文件的详解，读者可以参考本例，在学习示例代码的基础上，自行动手练习编写。

（19）进入“可视化”模块，可以进行后处理。

单击按钮，弹出图 11-40 所示的“通用绘图选项”对话框，选择“变形缩放系数”为“一致”，输入“数值”为“1”，单击“确定”。

单击按钮，视图区中 1:1 显示了变形后的模型如图 11-41 所示。

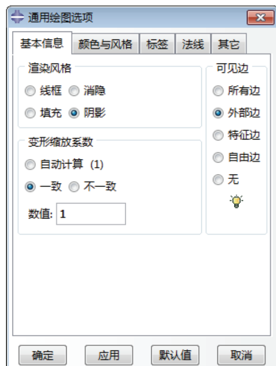


图 11-40 “通用绘图选项”对话框

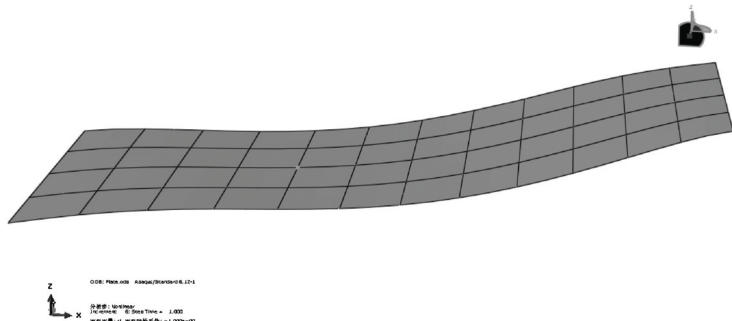
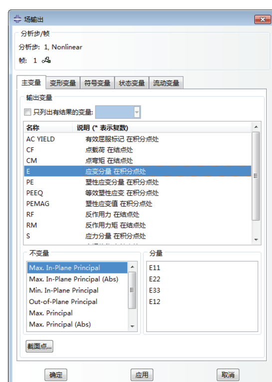


图 11-41 变形图

单击，选择积分点应变，如图 11-42 所示，单击“确定”，在视图区中显示积分点应变云图，如图 11-43 所示。



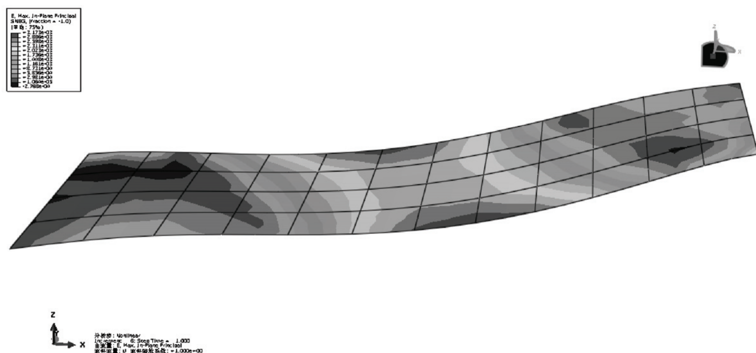
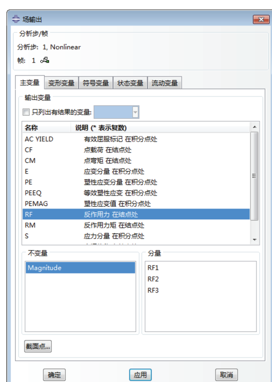


图 11-42 选择积分点变量　　　　图 11-43 积分点应变云图

单击，选择支点反力，如图 11-44 所示，单击“确定”，在视图区中显示支点反力图，如图 11-45 所示。



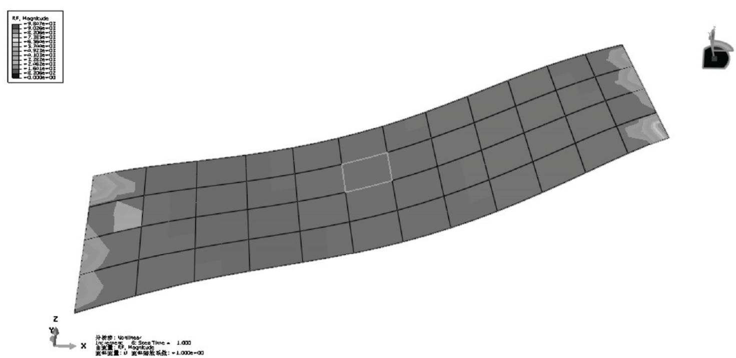
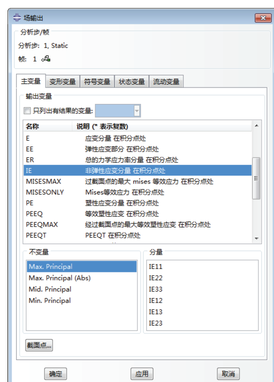


图 11-44 选择支点反力　　　　图 11-45 支点反力

单击，选择非弹性应变，如图 11-46 所示，单击“确定”，在视图区中显示非弹性应变云图，如图 11-47 所示。



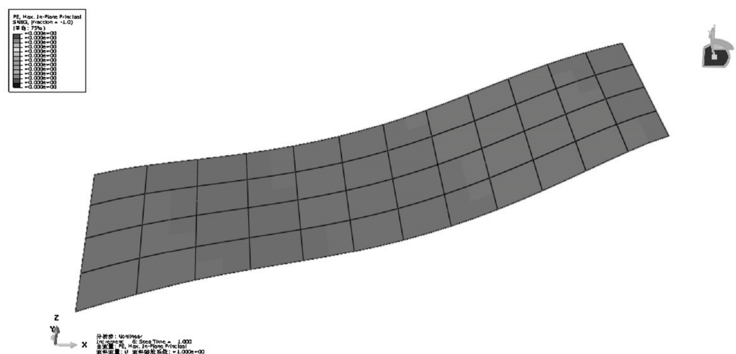


图 11-46 选择应变非弹性部分　　　　图 11-47 非弹性应变云图

本例为弹性材料，所以由图 11-47 可见看出应变非弹性分量均为零。

单击，选择最大 Mises 应力，如图 11-48 所示，单击“确定”，在视图区中显示最大

Mises 应力云图，如图 11-49 所示。

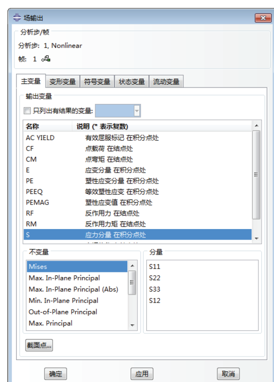


图 11-48　选择最大 Mises 应力

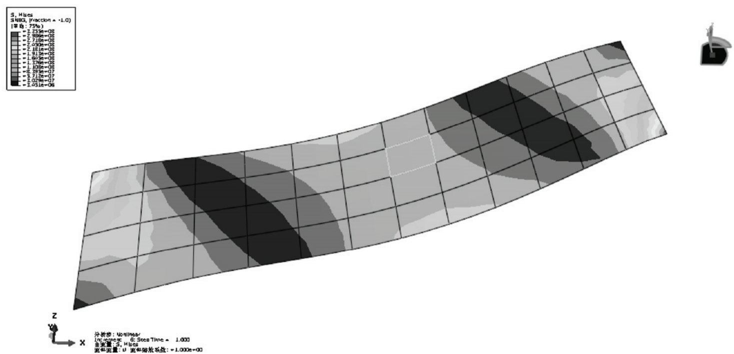


图 11-49　最大 Mises 应力云图

单击，选择等效压应变，如图 11-50 所示，单击“确定”，在视图区中显示等效压应力云图，如图 11-51 所示。

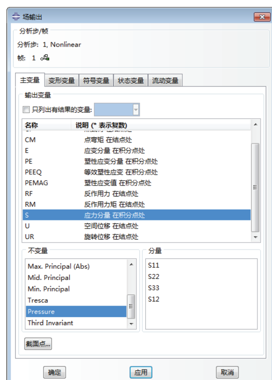


图 11-50　选择等效压应变

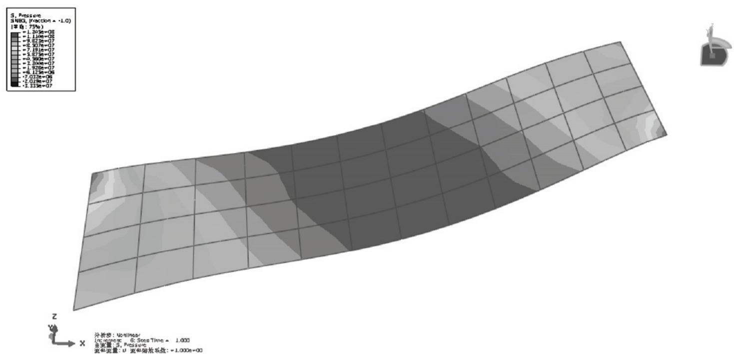


图 11-51　等效压应变云图

单击，选择最大主应力，如图 11-52 所示，单击“确定”，在视图区中显示最大主应力云图，如图 11-53 所示。

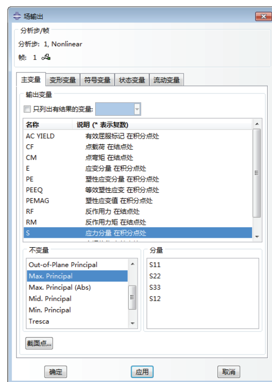


图 11-52　选择最大主应力

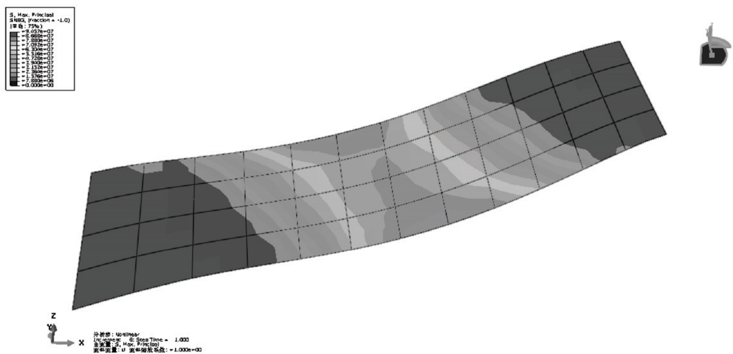


图 11-53　最大主应力云图

单击[图标]，选择符号变量下的应变，如图 11-54 所示，单击“确定”，在视图区中显示应变符号云图如图 11-55 所示。



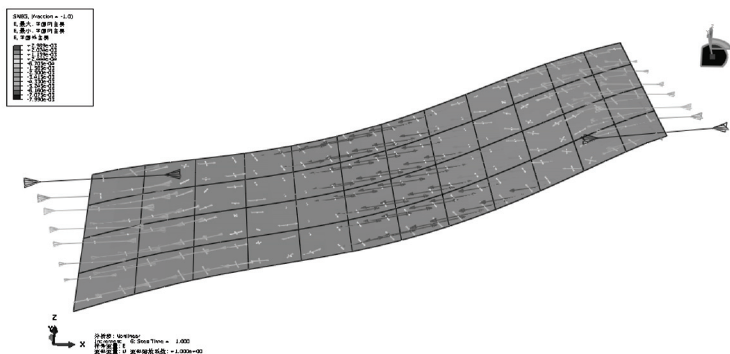
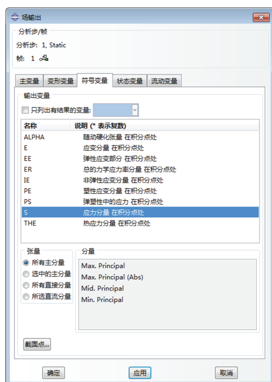


图 11-54　选择符号变量下的应变　　　图 11-55　应变符号云图

单击[图标]，选择符号变量下的应力，如图 11-56 所示，单击“确定”，在视图区中显示应力符号云图如图 11-57 所示。



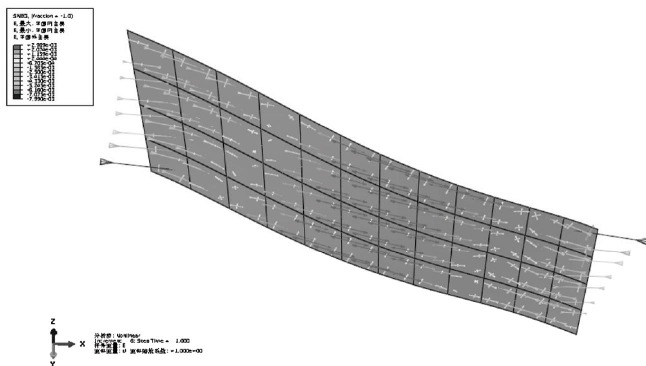
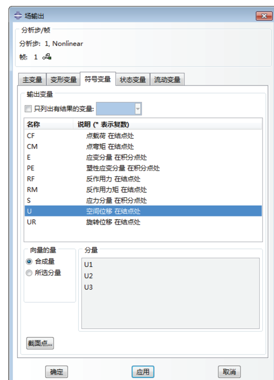


图 11-56　选择符号变量下的应力　　　图 11-57　应力符号云图

单击[图标]，选择符号变量下的平移位移，如图 11-58 所示，单击“确定”，在视图区中显示平移位移云图如图 11-59 所示。



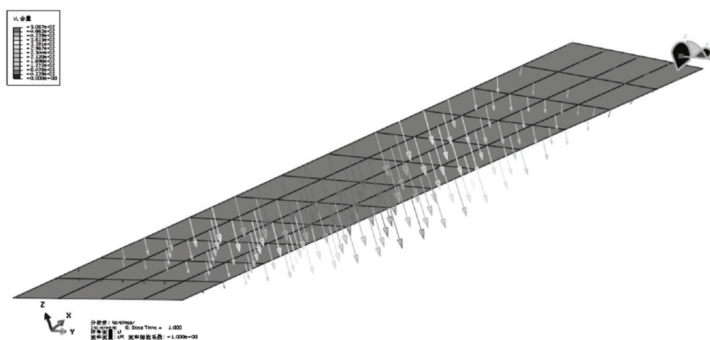


图 11-58　选择符号变量下的平移位移　　　图 11-59　平移位移云图

单击![]，选择符号变量下的反作用力，如图 11-60 所示，单击“确定”，在视图区中显示反作用力云图，如图 11-61。

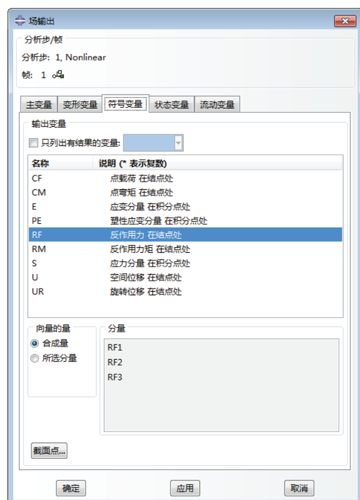


图 11-60　选择符号变量下的反作用力

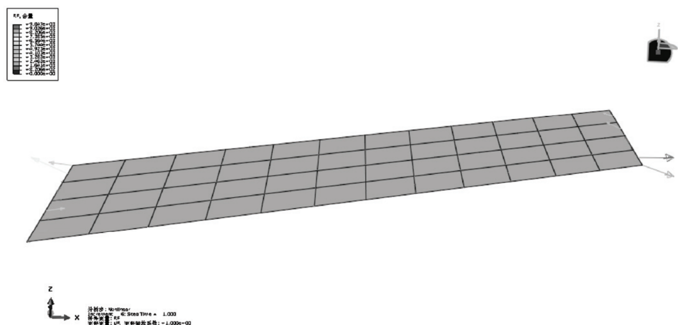


图 11-61　反作用力云图

11.2.2 材料非线性问题——橡胶的超弹性

如图 11-62 所示的橡胶支座，两端固定在厚度为 5mm 的钢板上，通过钢板把载荷均匀传给橡胶垫。该例中模型和载荷都是轴对称的，故在模拟中应用轴对称单元。在构件中取一个通过对称轴的平面，如图 11-62 右图所示，再根据该平面的对称性，取半平面来模拟，其中每个单元代表一个圆环。

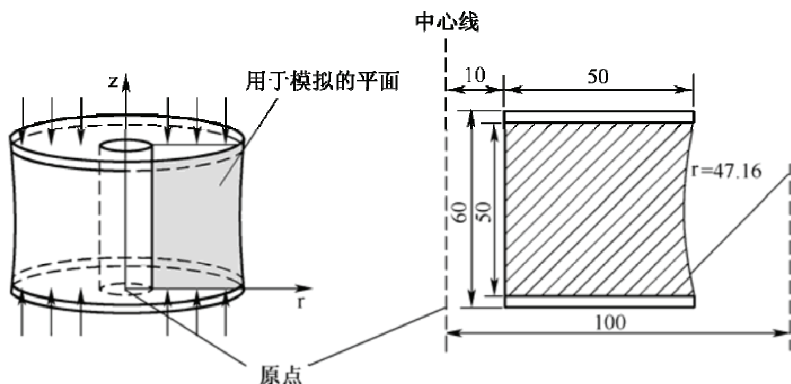


图 11-62　支座

对于应用在支座上的橡胶材料，其材料是不可压缩的。现有支座上橡胶材料的三组不同的试验数据：单轴拉伸试验、双轴拉伸试验和平面剪切试验，试验数据见表 11-1、表 11-2、表 11-3。

表 11-1 单轴拉伸试验

应力/MPa	应　变
0.054	38000
0.152	133800
0.254	221000
0.362	345000
0.459	460000
0.583	624200
0.656	851000
0.730	1426800

表 11-2 双轴拉伸试验数据

应力/MPa	应　变
0.089	20000
0.255	140000
0.503	420000
0.958	1490000
1.703	2750000
2.413	3450000

表 11-3 平面剪切试验

应力/MPa	应　变
0.055	69000
0.342	282800
0.758	1386200
1.269	3034500
1.779	4062100

图 11-63 所示为基于试验数据作出的材料曲线，试验曲线直观地表达了橡胶材料的非线性特征。

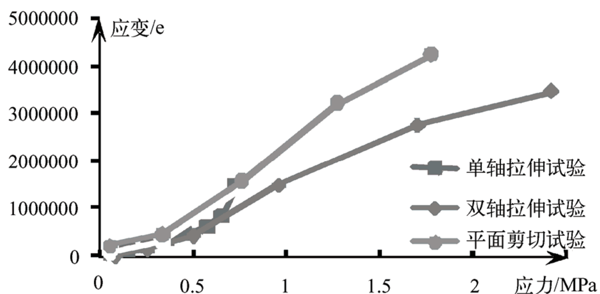


图 11-63 橡胶材料试验曲线

（1）启动 ABAQUS/CAE，新建一个采用 Standard/Explicit 类型的模型数据库。进入“部

件”功能模块，开始创建部件。

单击按钮，弹出图 11-64 所示的“创建部件”对话框，选择轴对称的壳部件，尺寸大约为“0.3”，单击“继续”按钮。

在视图区中绘制如图 11-65 所示的草图。



图 11-64 “创建部件”对话框

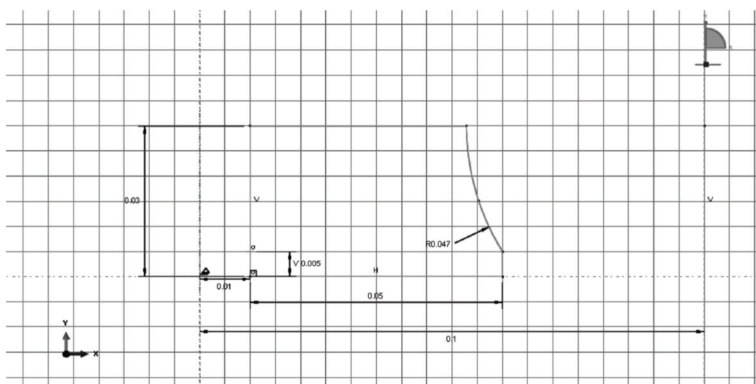


图 11-65 截面草图

完成截面草图绘制，单击中键，生成如图 11-66 所示的一个壳。

（2）单击按钮，将壳拆分为如图 11-67 所示的两个分区。

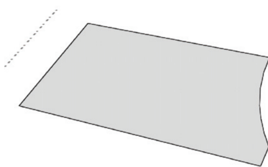


图 11-66 生成壳



图 11-67 两个分区

（3）进入“属性”功能模块，单击“编辑材料”按钮，弹出图 11-68 所示的“编辑材料”对话框。在对话框中的“试验数据”下拉菜单中，选择“等轴试验”选项，输入等轴试验数据，如图 11-69 所示。

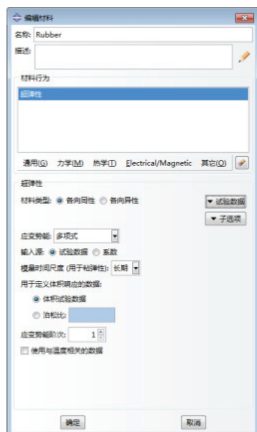


图 11-68 “编辑材料”对话框



图 11-69 输入等轴试验数据

在“编辑材料”对话框中的试验数据下拉菜单中，选择“双轴试验”选项，输入双轴试验数据如图 11-70 所示。选择“平面试验”选项，输入平面试验数据如图 11-71 所示。

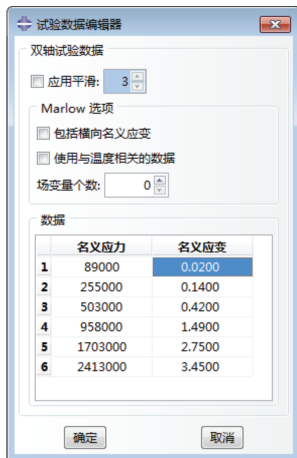


图 11-70　输入双轴试验数据

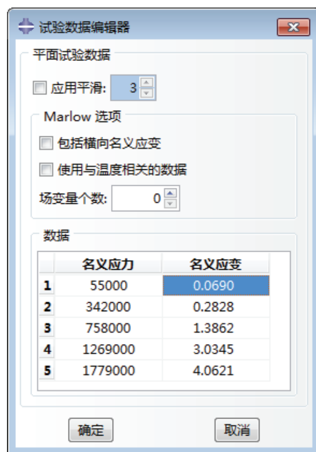


图 11-71　输入平面试验数据

输入完成后单击“确定”完成材料创建。图 11-72 所示为 ABAQUS 计算的材料参数与试验数据的对比。

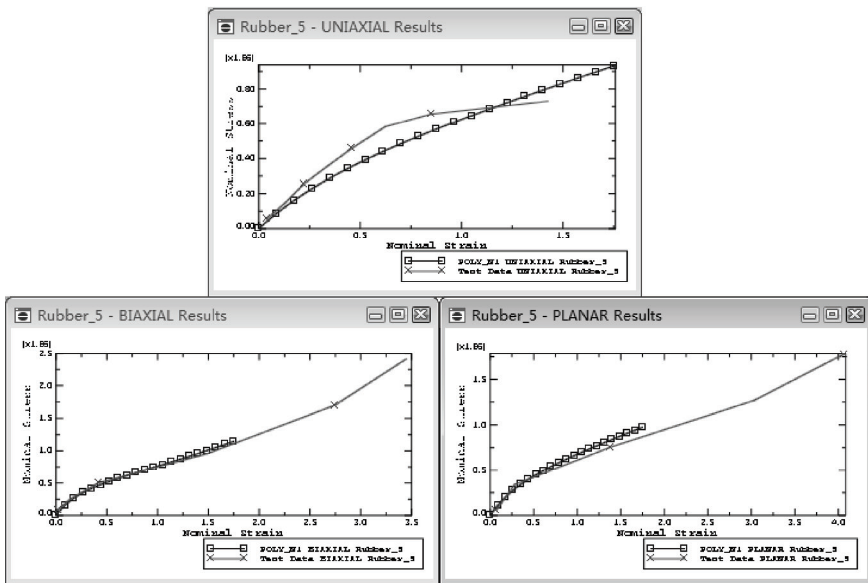


图 11-72　ABAQUS 材料参数与试验数据对比

与图形界面相比，命令方式对于这种复杂的材料行的定义更为直接。首先需要创建一个材料。

```
** MATERIALS
**
**创建名为 Rubber 的超弹性材料
```

```
*Material, name=Rubber
**
**然后输入超弹性材料的试验参数
*Hyperelastic, test data input
**单轴试验数据
*Biaxial Test Data
 89000., 0.02
255000., 0.14
503000., 0.42
958000., 1.49
 1.703e+06, 2.75
 2.413e+06, 3.45
**平面试验数据
*Planar Test Data
 55000.,0.069
342000., 0.2828
758000., 1.3862
 1.269e+06, 3.0345
 1.779e+06, 4.0621
**双轴试验数据
*Uniaxial Test Data
 54000.,0.038
152000., 0.1338
254000.,0.221
362000.,0.345
459000.,0.46
583000., 0.6242
656000.,0.851
730000., 1.4268
```

为方便起见可以直接从实验数据选择所要数据，复制到 INP 文件中，再修改为相应代码格式即可。

（4）由于本例的载荷不足以令钢材料发生非弹性的变形，所以钢材料直接采用线弹性材料即可。

请参考前面相关章节对线性静态分析的介绍，自行完成名称为“Steel”，弹性模量为 2×10^5MPa，泊松比为 0.3 的线弹性材料的创建。

或者在“关键字编辑器”中直接输入。

```
*Material, name=Steel
*Elastic
 2e+11, 0.3
```

（5）单击按钮，弹出图 11-73 所示的“创建截面”对话框，输入截面名称，定义截面类型为均质实体，单击“继续”按钮，弹出图 11-74 所示的“编辑截面”对话框。

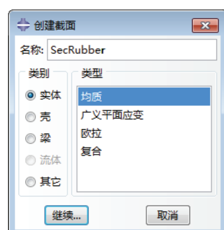


图 11-73 “创建截面”对话框



图 11-74 “编辑截面”对话框

选择 Rubber 材料，单击“确定”。重复上述操作，定义名为 SecSteel 的截面，选择钢材料。

（6）单击按钮，将橡胶材料与钢材料分别指派给对应的分区，如图 11-75 所示为橡胶材料分区，如图 11-76 所示为钢材料分区。



图 11-75 指派橡胶材料



图 11-76 指派钢材料

（7）进入“装配”模块，单击按钮，弹出图 11-77 所示的“创建实例”对话框，选择部件，单击“确定”完成实例化，如图 11-78 所示。

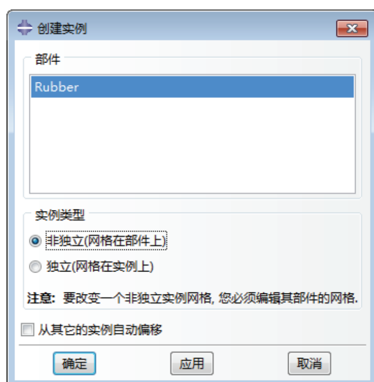


图 11-77 “创建实例”对话框



图 11-78 部件实例化

（8）进入“分析步”模块，单击按钮，弹出图 11-79 所示的“创建分析步”对话框，输入分析步名称，选择通用静力分析步，单击“继续”按钮。

弹出图 11-80 所示的“编辑分析步”对话框，打开几何非线性开关，在“增量”选项卡中设置初始时间增量为 0.01，单击“确定”完成分析步设置。

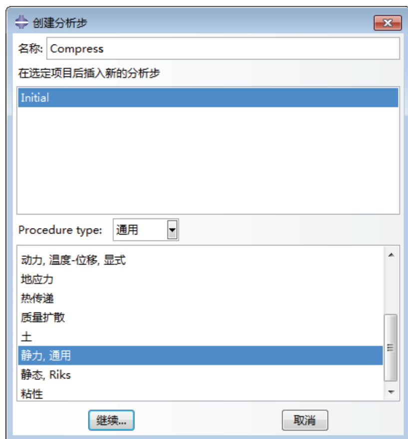


图 11-79 “创建分析步”对话框

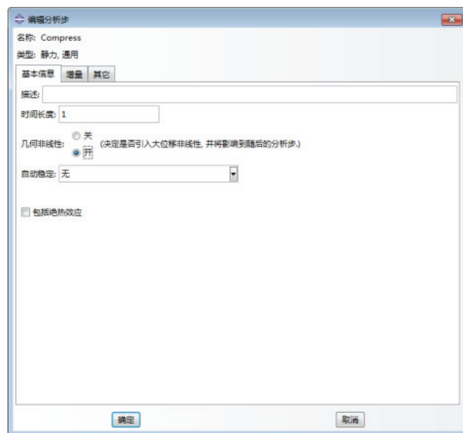


图 11-80 “编辑分析步”对话框

也可以采用如下方式定义分析步。

```
*Step, name=Compress, nlgeom=YES
**选择的分析步类型为通用静力分析
*Static
0.01, 1., 1e-05, 1.
**
```

（9）单击按钮，弹出图 11-81 所示的“场输出请求管理器”对话框，单击“编辑”按钮，弹出图 11-82 所示的“编辑场输出请求”对话框，按图 11-82 勾选输出请求。



图 11-81 “场输出请求管理器”对话框

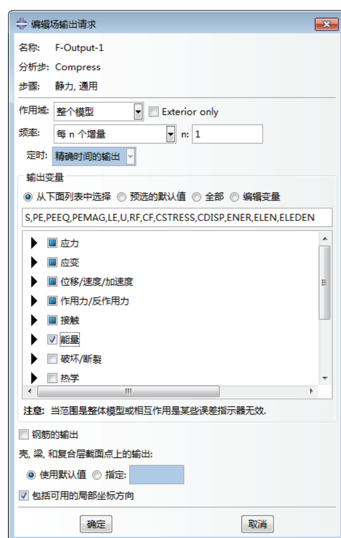


图 11-82 “编辑场输出请求”对话框

完成分析步设置后，进入“载荷”模块，开始载荷的定义。

（10）单击按钮，弹出图 11-83 所示的“创建载荷”对话框，选择“力学”类型下的“压强”，输入载荷名称，单击“继续”，拾取模型的下边线，单击中键弹出图 11-84 所示的“编辑载荷”对话框。

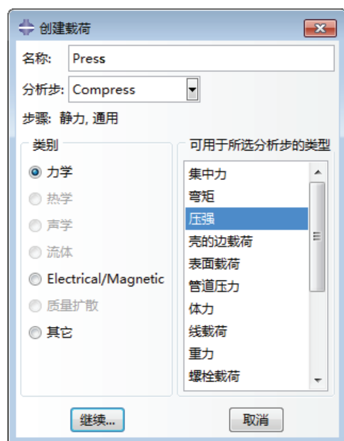


图 11-83 “创建载荷”对话框



图 11-84 “编辑载荷”对话框

输入载荷的大小为“0.5E6”，即 0.5MPa，单击“确定”。

也可以使用 DSLOAD 命令指定载荷。

```
** Name: PressType: Pressure
*Dsload
Surf-1, P, 500000.
**
```

（11）单击按钮，弹出图 11-85 所示的“创建边界条件”对话框，选择“力学”类别下的“对称/反对称/完全固定”类型，单击“继续”，拾取模型上边线，单击中键，弹出图 11-86 所示的“编辑边界条件”对话框。

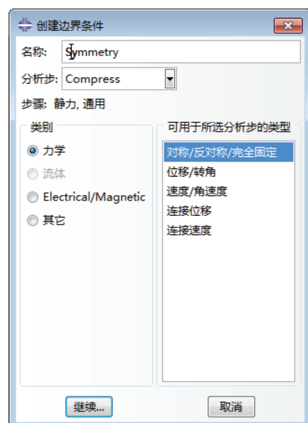


图 11-85 “创建边界条件”对话框



图 11-86 “编辑边界条件”对话框

选择“YSYMM(U2=UR1=UR3=0)”，即 Y 方向对称，单击“确定”完成边界定义。

命令方式如下，更为简洁。

```
** Name: Symmetry Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary
Set-1, YSYMM
**
```

由于 ABAQUS 可以自行避免刚体运动，所以载荷与边界定义完成后不用再进行其他约束。

（12）进入“网格”模块。单击（为边布种）按钮，按〈Shift〉键拾取所有水平边线，单击中键弹出图 11-87 所示的“局部种子”对话框，选择“按个数”控制单元，输入单元数为“30”，单击“确定”完成设置。

重复上述操作，为橡胶材料的竖直边定义 14 个单元，钢材料的竖向边定义 1 个单元，完成布种如图 11-88 所示。

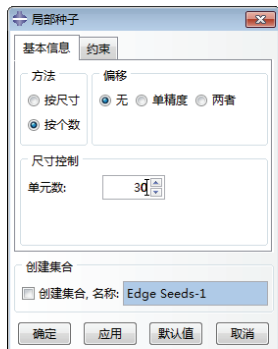


图 11-87 “局部种子”对话框

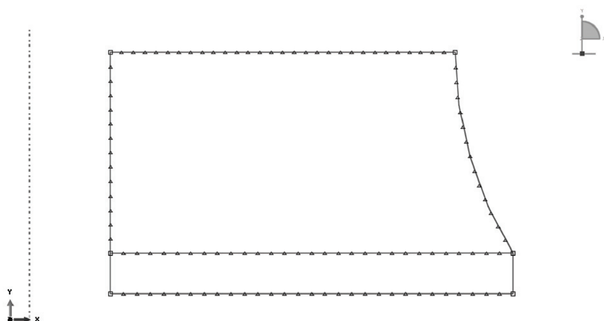


图 11-88 完成布种

（13）单击按钮，拾取两个分区，单击中键，弹出图 11-89 所示的“网格控制属性”对话框，选择四边形单元，“技术”为“结构”，单击“确定”完成设置。

单击按钮，拾取模型的上半分区，单击中键，弹出图 11-90 所示的“单元类型”对话框，选择轴对称的杂交实体单元（CAX4H），单击“确定”完成设置。在命令中，对应的区域应使用如下命令。

```
*Element, type=CAX4H
```

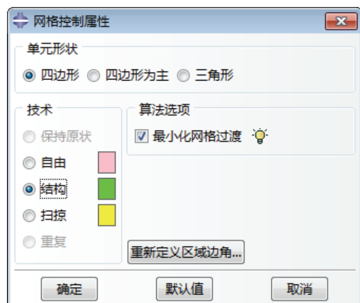


图 11-89 “网格控制属性”对话框

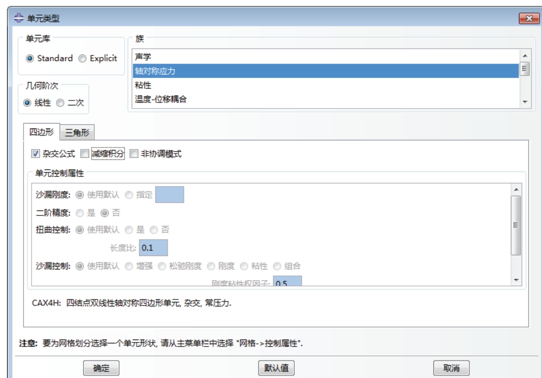


图 11-90 “单元类型”对话框

重复上述操作，为模型的下半分区即钢材料部分指定为单层的非协调元模式单元（CAX4I）。在命令中，对应的区域应使用如下命令。

```
*Element, type=CAX4I
```

（14）单击按钮，再单击中键，完成网格划分如图 11-91 所示。

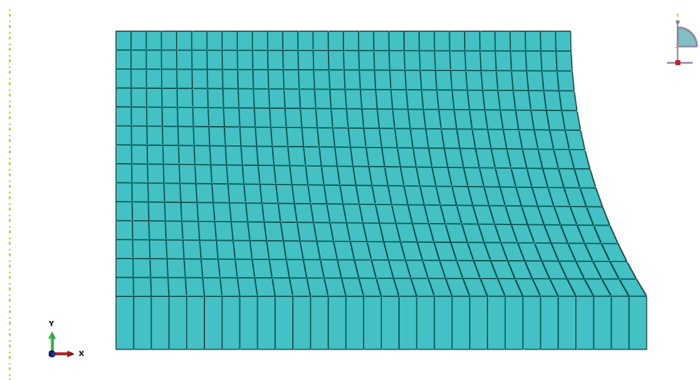


图 11-91　完成网格划分

完成网格划分后，即可以开始创建分析作业，进入“作业”模块。

（15）单击按钮，弹出图 11-92 所示的“创建作业”对话框。输入作业名称，单击“继续”按钮，弹出图 11-93 所示的“编辑作业”对话框。

在“编辑作业”对话框的“通用”选项卡中，勾选“打印输入数据的 echo”，单击“确定”完成。



图 11-92 “创建作业”对话框

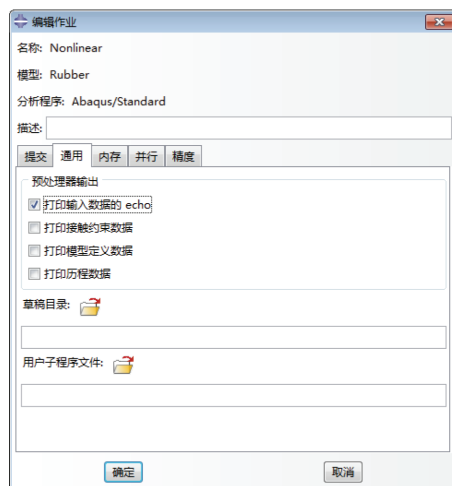


图 11-93 “编辑作业”对话框

至此提交分析的设置已完成。

（16）单击按钮，弹出图 11-94 所示的“作业管理器”对话框，单击“写入输入文件”按钮完成 INP 文件的写入。单击“数据检查”，信息区显示：

“作业输入文件 "Nonlinear.inp" 已提交分析。

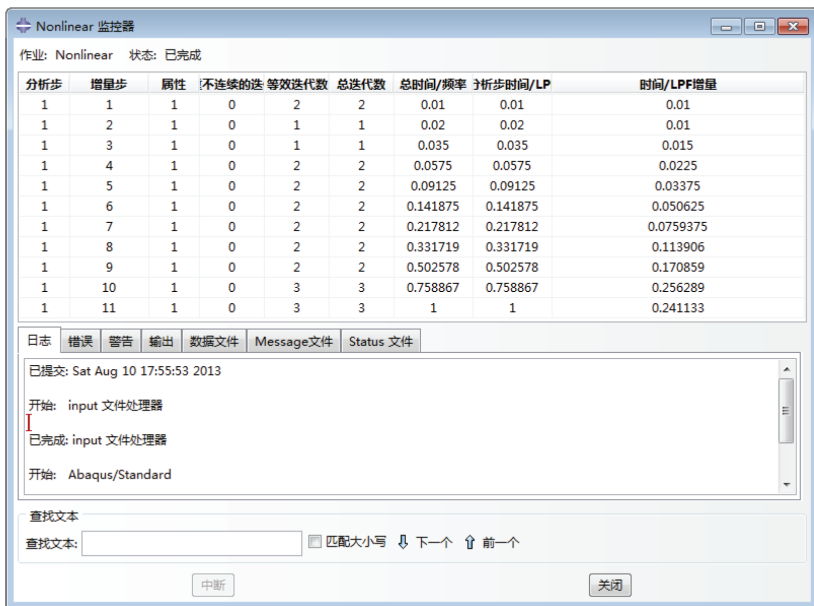


图 11-94　作业管理器

Job Nonlinear: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job Nonlinear: Abaqus/Standard completed successfully.
Job Nonlinear completed successfully.”

说明检查成功，可以进入分析。

单击“提交”，开始分析。在图 11-95 所示的监控器中可以监视分析过程。



分析步	增量步	属性	不连续的迭	等效迭代数	总迭代数	总时间/频率	析步时间/LP	时间/LPF增量
1	1	1	0	2	2	0.01	0.01	0.01
1	2	1	0	1	1	0.02	0.02	0.01
1	3	1	0	1	1	0.035	0.035	0.015
1	4	1	0	2	2	0.0575	0.0575	0.0225
1	5	1	0	2	2	0.09125	0.09125	0.03375
1	6	1	0	2	2	0.141875	0.141875	0.050625
1	7	1	0	2	2	0.217812	0.217812	0.0759375
1	8	1	0	2	2	0.331719	0.331719	0.113906
1	9	1	0	2	2	0.502578	0.502578	0.170859
1	10	1	0	3	3	0.758867	0.758867	0.256289
1	11	1	0	3	3	1	1	0.241133

图 11-95　监控器界面

本例为读者提供了 INP 文件，读者可以参考本例，通过示例代码，练习自己动手编写。

（17）完成分析后，单击“作业管理器”中的“结果”按钮，即进入“可视化”模块，进行后处理。

单击，选择主变量下的应变能，如图 11-96 所示，单击“确定”，在视图区中显示应变能云图，如图 11-97 所示。

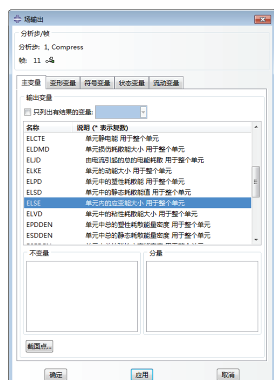


图 11-96　选择应变能

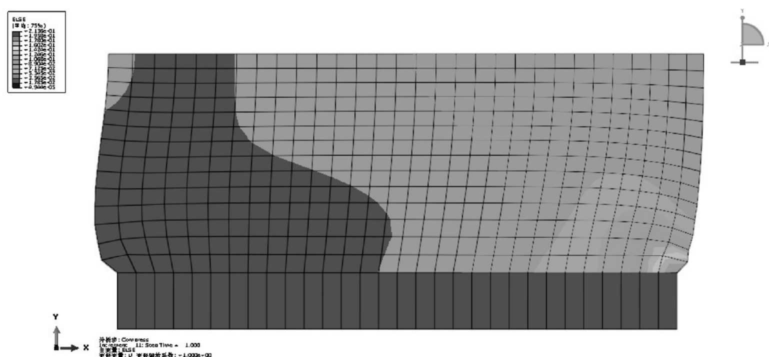


图 11-97　应变能云图

单击![icon]，选择主变量下的弹性应变能密度，如图 11-98 所示，单击“确定”，在视图区中显示弹性应变能密度云图，如图 11-99 所示。

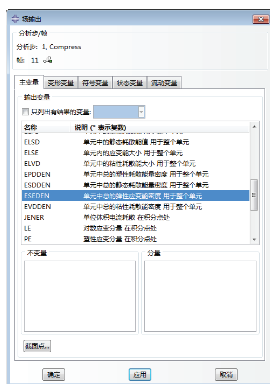


图 11-98　选择弹性应变能密度

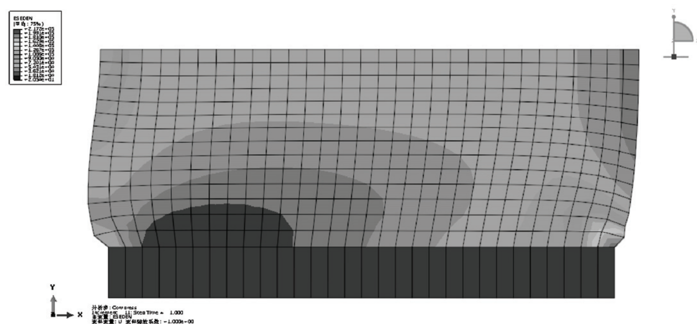


图 11-99　弹性应变能密度云图

单击![icon]，选择主变量下的反作用力，如图 11-100 所示，单击“确定”，在视图区中显示反作用力云图，如图 11-101 所示。

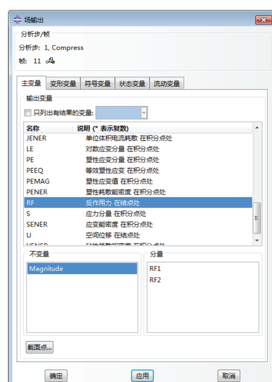


图 11-100　选择反作用力

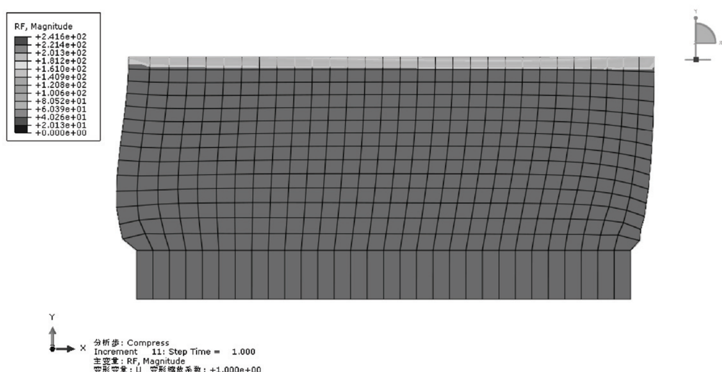
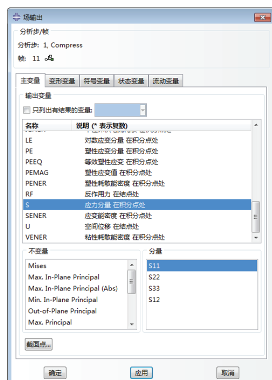


图 11-101　反作用力云图

单击![icon]，选择主变量下的积分点应力分量，选择 S11 分量，如图 11-102 所示，单击“确定”，在视图区中显示第一主应力云图，如图 11-103 所示。



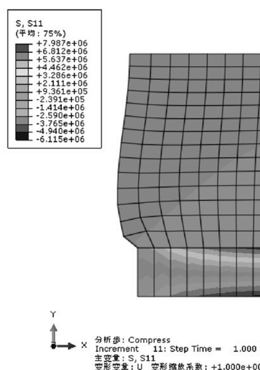
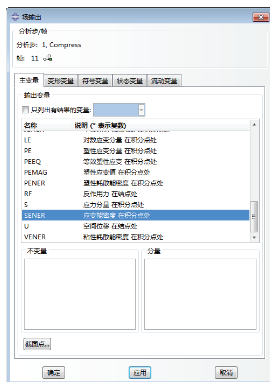


图 11-102 选择积分点应力分量　　　　图 11-103 第一主应力云图

单击，选择主变量下的积分点处的应变能密度，如图 11-104 所示，单击“确定”，在视图区中显示积分点处的应变能密度云图，如图 11-105 所示。



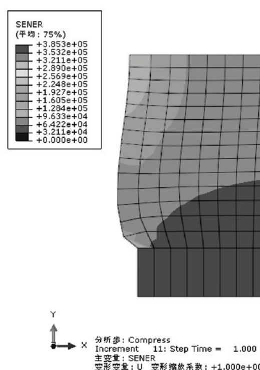
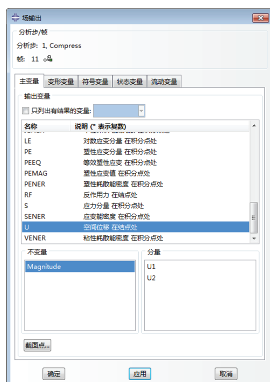


图 11-104 积分点处的应变能密度　　　　图 11-105 积分点处的应变能密度云图

单击，选择主变量下的空间位移，如图 11-106 所示，单击“确定”，在视图区中显示结点位移云图，如图 11-107 所示。



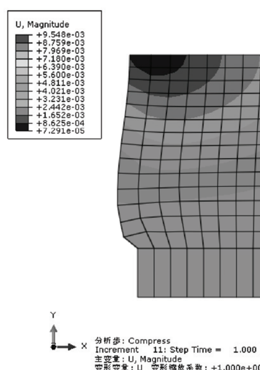
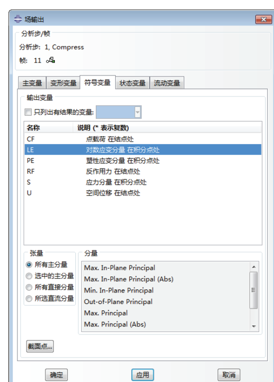


图 11-106 选择空间位移　　　　图 11-107 结点位移云图

单击，选择符号变量下的对数应变分量，如图 11-108 所示，单击“确定”，在视图区中显示对数应变分量符号图，如图 11-109 所示。



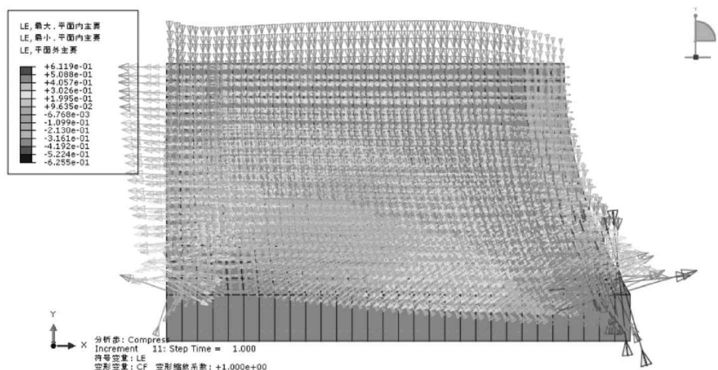
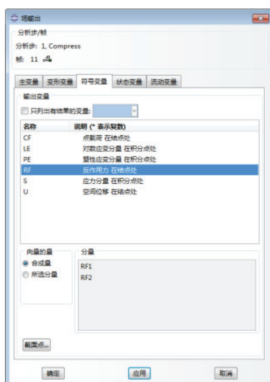


图 11-108　选择对数应变分量　　　　图 11-109　对数应变分量符号图

单击，选择符号变量下的反作用力，如图 11-110 所示，单击“确定”，在视图区中显示反作用力符号图，如图 11-111 所示。



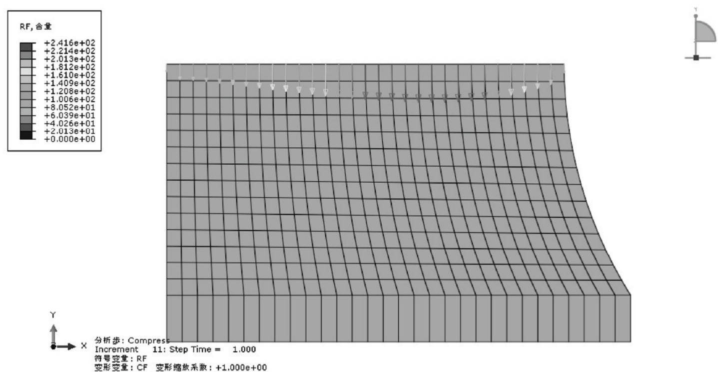
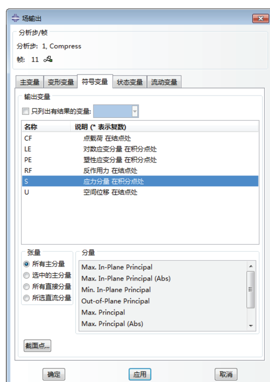


图 11-110　选择反作用力　　　　图 11-111　反用力符号图

此时的反作用力实际上是该截面的内力。

单击，选择符号变量下的应力，如图 11-112 所示，单击“确定”，在视图区中显示应力符号图，如图 11-113 所示。



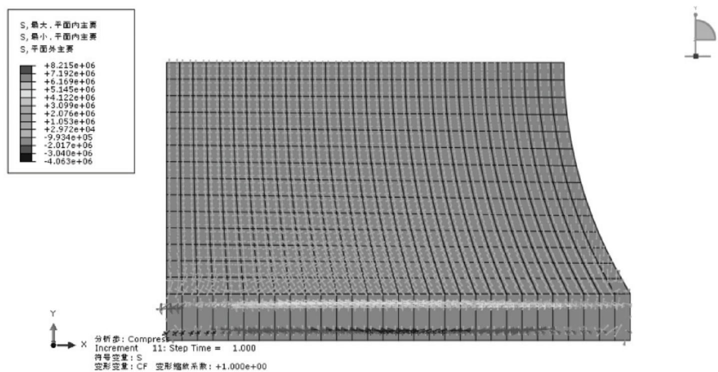


图 11-112　选择符号变量下的应力　　　　图 11-113　应力符号图

单击 ，选择符号变量下的变形，如图 11-114 所示，单击“确定”，在视图区中显示变形符号，如图 11-115 所示。

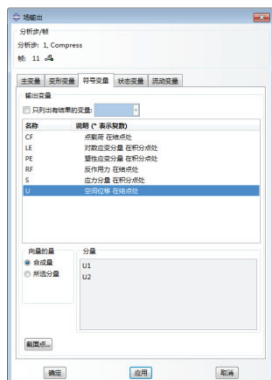


图 11-114　选择符号变量下的变形

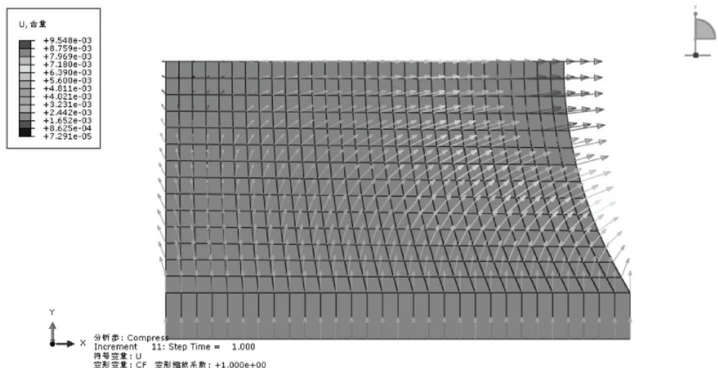


图 11-115　变形符号

11.3　本章小结

结构问题中存在着三种非线性来源：材料，几何和边界（接触）。这些因素的任意组合都可以出现在 ABAQUS 的分析中。

非线性问题是利用 Newton-Raphson 法来进行迭代求解的，非线性问题比线性问题所需要的计算机资源要多许多倍。

非线性分析步被分为许多增量步。ABAQUS 通过迭代，在新的载荷增量结束时近似地达到静力学平衡。ABAQUS 在整个模拟计算中用收敛来控制载荷的增量。

监控器（Job Monitor）或状态文件允许在系统运行时进行监控。所生成的信息文件包含载荷增量和迭代过程的详细信息。

在每个增量步结束时可以保存计算结果，这样结构响应的演变就可以在“可视化”（Visualization）模块中显示出来。计算结果也可以用 x-y 图的形式绘出。



第 12 章　动力学分析

在工程结构的设计工作中，动力学设计和分析是必不可少的一部分。几乎所有的现代工程结构都面临着动力问题。在航空航天、船舶和汽车等行业，动力学问题更加突出，在这些行业中有大量的旋转结构，例如轴、轮盘等。这些结构一般来说在整个机械中占有极其重要的地位，它们的损坏大部分是由于共振引起较大振动应力而引起的。由于处于旋转状态，它们所受外界激振力比较复杂，更要求对这些关键部件进行完整的动力设计和分析。本章将讲解 ABAQUS 强大的动力学分析功能的基础知识及分析方法。

本章学习目标

- 掌握动力学分析基本理论
- 掌握不同类型动力学分析的基本概念
- 掌握线性动力学分析的方法
- 掌握非线性动力学分析的方法

12.1　动力学分析的理论基础

动态模拟是将惯性力包含在动力学平衡方程中：

$$M\ddot{u} + I - P = 0 \tag{12-1}$$

式中　M——结构的质量；

$\ddot{u}$——结构的加速度；

I——结构中的内力；

P——所施加的外力。

动态分析和静态分析最主要的不同在于平衡方程中包含惯性力项（$M\ddot{u}$）。两者的另一个不同之处在于内力的定义。在静态分析中，内力仅由结构的变形引起；而动态分析中的内力包括运动（例如阻尼）和结构变形的共同影响。

12.1.1　固有频率和模态

最简单的动力问题是弹簧上的质量振动，如图 12-1 所示。

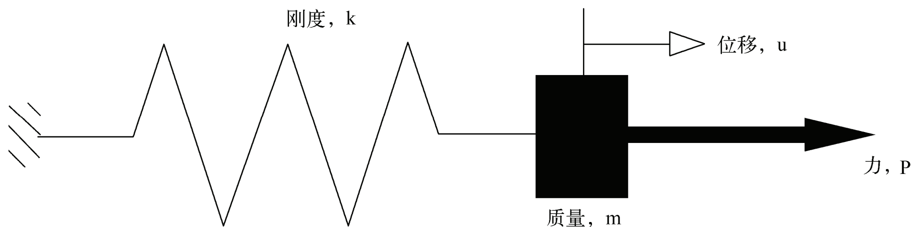


图 12-1　质量－弹簧系统

弹簧的内力为ku，代入式（12-1）中，得到运动方程为

$$M\ddot{u} + ku - P = 0 \tag{12-2}$$

这个质量-弹簧系统的固有频率（单位是弧度/秒）为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{12-3}$$

如果质量块被移动后再释放，它将以这个频率振动。假若以此频率施加一个动态外力，位移的幅度将剧烈增加——即出现共振现象。

实际的结构具有多个固有频率。因此，在设计结构时要避免使各固有频率与可能的载荷频率过分接近。固有频率可以通过分析结构在无载荷（动力平衡方程中的 P=0）时的动态响应而得到。此时，运动方程变为

$$M\ddot{u} + I = 0 \tag{12-4}$$

对于无阻尼系统，$I = Ku$，代入式12-4中，则方程变为

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \tag{12-5}$$

这个方程解的形式为

$$u = \phi e^{i\omega t} \tag{12-6}$$

将式（12-6）代入到运动方程中便得到了特征值问题方程为

$$k\phi = \lambda M\phi \tag{12-7}$$

式中　$\lambda = \omega^2$。

该系统具有 n 个特征值，此处 n 是有限元模型的自由度数。记λ_j为第 j 个特征值。它的平方根ω_j是结构的第 j 阶固有频率，并且ϕ_j是相应的第 j 阶特征向量。特征向量就是模态（也称为振型），因为它是结构在第j阶振型下的变形状态。

在 ABAQUS 中，频率提取程序用来求解结构的振型和频率。这个程序使用起来十分简单，只要给出所需振型的数目和所关心的最高频率即可。

12.1.2 振型叠加

在线性问题中，结构在载荷作用下的动力响应可以用固有频率和振型来表示，即结构的变形可以采用振型叠加的技术由各振型的组合得到，每一阶模态都要乘以一个标量因子。模型中位移矢量u定义如式（12-8）所示：

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} \partial_i \phi_i \tag{12-8}$$

式中　∂_i——振型ϕ_i的标量因子。

这一技术只在模拟小变形、线弹性材料及无接触条件情况下是有效的，即必须是线性问题。

在结构动力学问题中，结构的响应往往取决于相对较少的几阶振型，这使得振型叠加方法在计算这类系统的响应时特别有效。考虑一个含有10 000个自由度的模型，则对运动方程的直接积分需要在每个时间点上求解10 000个联立方程组。但若结构的响应采用100阶振型来描述，那么在每个时间步上只需求解 100 个方程。更重要的是，振型方程是解耦的，而原来的运动方程是耦合的。虽然在计算振型和频率时需要花费一些时间作为代价，但在计算响应时将节省大量的时间。

如果在模拟中存在非线性，那么在分析中固有频率会发生明显的变化，因此振型叠加法将不再适用。在这种情况下，需要对动力平衡方程直接积分，这将比振型分析要花费更多的时间。

具有下列特点的问题才适于进行线性瞬态动力学分析：

系统是线性的——具有线性材料特性，无接触条件，无非线性几何效应；

响应只受较少的频率支配，当响应中各频率成分增加时，例如撞击和冲击问题，振型叠加方法的有效性将大大降低；

载荷的主要频率在所提取的频率范围内，以确保对载荷的描述足够精确；

任何突然加载所产生的初始加速度都能用特征模态精确描述；

系统的阻尼不能过大。

12.1.3 阻尼

如果一个无阻尼结构作自由振动，则它的振幅会保持恒定不变。然而，在实际中由于结构运动而能量耗散，振幅将逐渐减小直至振动停止，这种能量耗散称为阻尼。通常假定阻尼为粘滞的或正比于速度。式（12-1）可以写成包含阻尼的形式：

$$M\ddot{u} + (Ku + C\dot{u}) - p = 0 \qquad (12\text{-}9)$$

式中　C——结构的阻尼阵；

$\dot{u}$——结构的速度。

能量耗散来自于诸多因素，其中包括结构结合处的摩擦和局部材料的迟滞效应。阻尼概念对于无需顾及能量吸收过程的细节表征而言是一个很方便的方法。

在 ABAQUS 中，是针对无阻尼系统计算其振型的。然而，大多数工程问题还是包含阻尼的，尽管阻尼可能很小。有阻尼的固有频率和无阻尼的固有频率的关系如式（12-10）所示：

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\varsigma^2} \qquad (12\text{-}10)$$

式中　ω_d——阻尼特征值；

$\varsigma = \dfrac{c}{c_0}$——临界阻尼比；

c——该振型的阻尼；

c_0——临界阻尼。

对ς较小的情形（ς<0.1），有阻尼系统的特征频率非常接近于无阻尼系统的相应值。当ς增大时，采用无阻尼系统的特征频率就不太准确。当ς接近于 1 时，就不能采用无阻尼系统的特征频率了。

当结构处于临界阻尼（ς=1）时，施加一个扰动后，结构不会有摆动而是很快地恢复到静止的初始形态，如图 12-2 所示。

模拟动力学过程要定义阻尼。阻尼是分析步定义的一部分，每阶振型可以定义不同数量的阻尼。

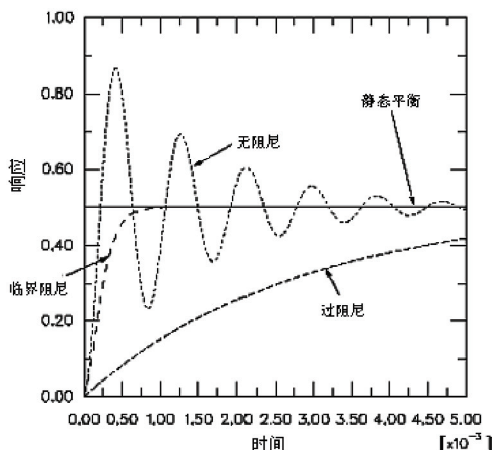


图 12-2　临界阻尼状态

在 ABAQUS 中，为了进行瞬时模态分析，可定义不同类型的阻尼：直接模态阻尼，瑞利（Rayleigh）阻尼和复合模态阻尼。

■ 直接模态阻尼

采用直接模态阻尼可以定义对应于每阶振型的临界阻尼比ς。ς的典型取值范围是 1%～10%。直接模态阻尼允许精确定义每阶振型的阻尼。

■ 瑞利阻尼

瑞利阻尼假设阻尼矩阵是质量矩阵和刚度矩阵的线性组合：

$$C = \alpha M + \beta K \tag{12-11}$$

式中　α和β——用户定义的常数。

尽管假设阻尼正比于质量和刚度没有严格的物理基础，但实际上我们对于阻尼的分布知之甚少，也就不能保证使用更为复杂的阻尼模型是正确的。一般来讲，这个模型对于大阻尼系统——临界阻尼超过 10%时，是失效的。相对于其他形式的阻尼，可以精确地定义系统每阶模态的瑞利阻尼。

■ 复合阻尼

在复合阻尼中，可以定义每种材料的临界阻尼比。复合阻尼是对应于整体结构的阻尼。当结构中有许多不同种类材料时，这一选项是十分有用的。

在大多数线性动力学问题中，恰当地定义阻尼对于获得精确的结果是十分重要的。但是阻尼只是对结构吸收能量这种特性的近似描述，而不是去仿真造成这种效果的物理机制。所以，确定分析中所需要的阻尼数据是很困难的。有时，可以从动力试验中获得这些数据，但是在多数情况下，需要通过经验或参考资料获得数据。在这些情况下，要仔细地分析计算结果，应该通过参数分析来评价阻尼系数对于模拟的敏感性。

事实上，ABAQUS 的所有单元均可用于动力分析。选取单元的一般原则与静力分析相同。但是，在模拟冲击和爆炸载荷时，应选用一次单元。因为它们具有集中质量公式，在模拟应力波效果方面优于采用二次单元的一致质量公式。

在动力分析中，剖分网格需要考虑响应中将被激发的振型，网格剖分应能充分反映那些振型。因为能满足静态模拟要求的网格，不一定能计算高频振型的动态响应。

如图 12-3 所示的平板，用一次壳单元剖分的网格对于受均布载荷的静力分析以及一阶振型的预测是适用的。但是，该网格对于精确模拟第六阶振型就显得太粗糙了。

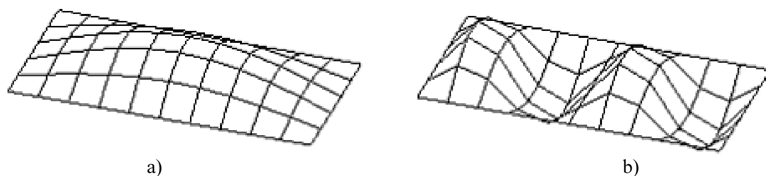


图 12-3　平板的粗网格

a) 模态 1:31.1Hz　b) 模态 6:140Hz

图 12-4 显示了同样的板用一次单元进行更精细的网格剖分后所模拟的结果。由图中可看出，第六阶振型的位移看起来明显较好，预测的频率也更为准确。因此，可以得出：如果作用在板上的动载会显著地激发该阶振型，则应采用精细的网格；采用粗网格将得不到精确的结果。

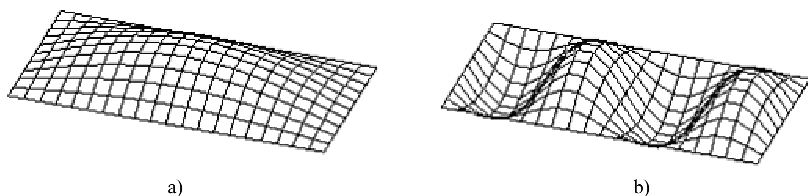


图 12-4　平板的精细网格

a) 模态 1:30.2Hz　b) 模态 6:124Hz

12.1.4 瞬态动力学

瞬态动力学分析需要求解半离散的方程组。离散是指结构由离散的结点描述；半离散是指在方程的导出过程中，每个时刻都要满足平衡。在瞬态分析中，连续的时间周期分为许多时间间隔，并且只有在离散的时间上才能得到解。

对于线性动力学问题，动力学行为由两个独立的特性决定：线弹性（动力）结构行为和施加的动力载荷。

因此，求解动力学问题的一种方法是：首先可不考虑施加的载荷进行结构动力分析（即模态分析）来确定特征值；其次基于结构的特征值和特征模态计算给定载荷历程的结构动力响应。这一过程称为模态分析或模态叠加法。由于高阶模态不准确，因而比较成功的应用大都在于有低频范围的激振的结构。

另一种方法，动力学方程可以作为施加载荷的函数而直接积分。积分方法有多种，重要的一点就是稳定性和精度。这些方法可以用于短波长问题，只要有限元网格足够细密，就能够描述这些局部的现象。

用于瞬态动力分析的运动方程和通用运动方程相同：

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\} \tag{12-12}$$

这是瞬态分析的最一般形式，载荷可为时间的任意函数；对于线性问题矩阵[M]、[C]和[K]均与{u}及其时间导数无关。

基于求解方法，ABAQUS 允许在瞬态动力分析中包括各种类型的非线性——大变形、接触问题及塑性材料等。常用的求解方法如图 12-5 所示。

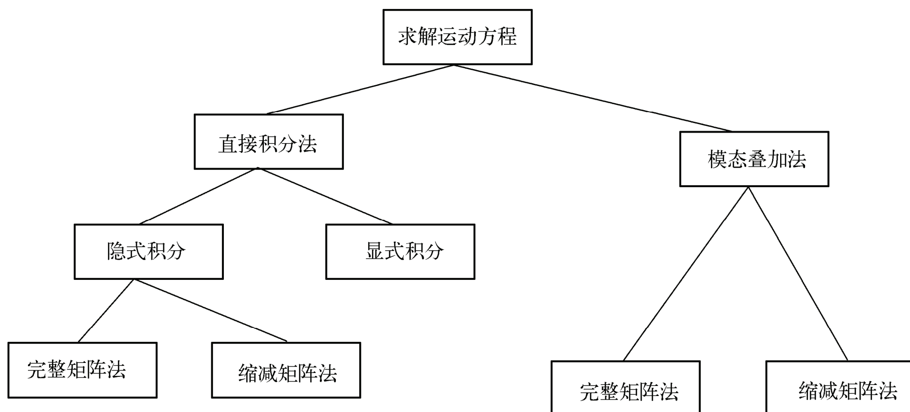


图 12-5　瞬态动力学求解方法

其中缩减矩阵和完整矩阵的主要区别如下。

（1）缩减矩阵：

■ 用于快速求解；

■ 根据主自由度写出[K]、[C]和[M]等矩阵，主自由度是完全自由度的子集；

■ 缩减的[K]是精确的，但缩减的[C]和[M]是近似的。此外，还有其他一些缺陷。

（2）完整矩阵：

■ 不进行缩减；

■ 采用完整的[K]、[C]和[M]矩阵。

12.2 动力学问题实例

动力学分析常用于下列物理现象：振动（例如由于旋转机械引起的振动）、冲击（例如汽车的碰撞、冲压等）、变化载荷（例如曲轴和一些旋转机械的载荷）、地震载荷（例如地震、冲击波等）及随机振动（例如火箭发射、汽车的颠簸等）。

12.2.1 线性动力学问题实例——模态分析

模态分析用于确定零部件的固有频率。可以使设计师在设计时避开这些频率或者最大限度地减少对这些频率上的激励，从而消除过度振动和噪声。本例提供模态分析的基本步骤与方法，分析结果可以为设计提供重要的参数。

如图 12-6 所示为一个联轴器，六个螺栓孔均匀分布，材料为钢，材料密度为 $7800kg/m^3$，弹性模量为 206GPa，泊松比为 0.3，轴端面只能作旋转运动，连接面与另一个端面配合，求该联轴器的前 30 阶频率和振型。

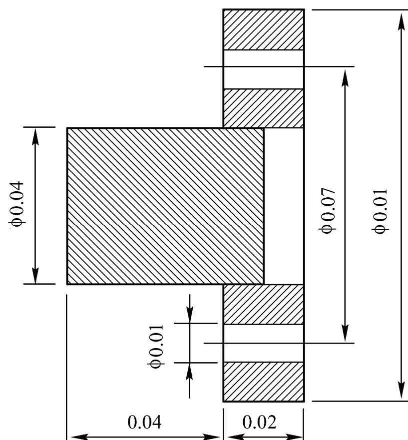


图 12-6 几何尺寸

（1）启动 ABAQUS/CAE，创建一个模型数据库，进入“部件”模块。

单击按钮，弹出图 12-7 所示的“创建部件”对话框，“类型”选择“旋转”，单击“继续”，在草图中绘制如图 12-8 所示的草图。

图 12-7 “创建部件”对话框

图 12-8 草图

（2）完成草图后单击中键，弹出图 12-9 所示的“编辑旋转”对话框，设置旋转“角度”为“360”，单击“确定”，生成如图 12-10 所示的模型。

图 12-9 “编辑旋转”对话框

图 12-10 旋转完成

（3）单击按钮，选择上一步生成模型的底面，选择底面上的直线为边轴，单击中键，进入草图，绘制如图 12-11 所示的螺栓孔草图。

图 12-11 绘制螺栓孔草图

单击按钮，拾取上一步绘制的圆，单击中键，弹出图 12-12 所示的“环形阵列”对话框，输入“个数”为“6”，“总角度”为“360”，单击“确定”，完成圆孔的阵列，如图 12-13 所示。



图 12-12 “环形阵列”对话框

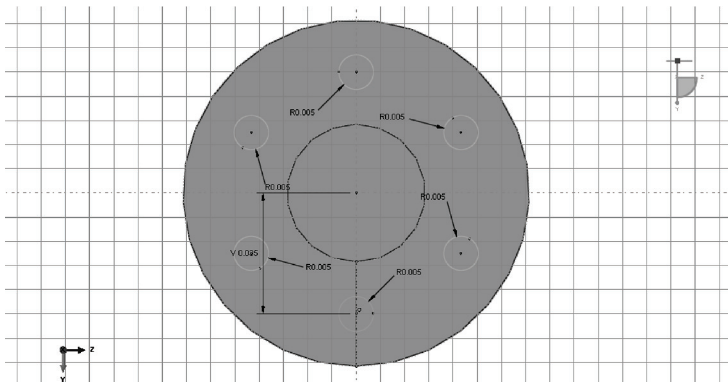


图 12-13 圆孔阵列

（4）单击中键，弹出图 12-14 所示的“编辑切削拉伸”对话框，选择切削深度为“通过所有”，单击“确定”按钮，完成切削后模型如图 12-15 所示。



图 12-14 “编辑切削拉伸”对话框

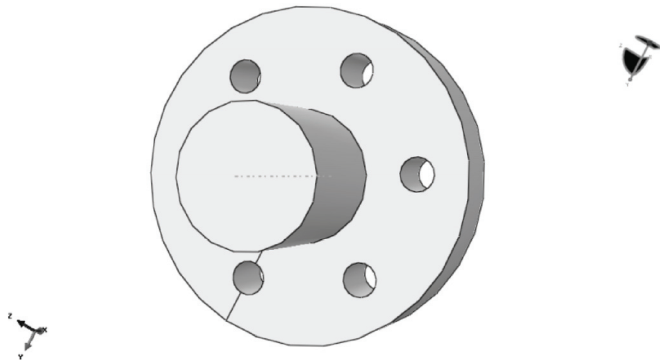


图 12-15 建模完成

至此，模型建立完成。

（5）进入“属性”模块，单击按钮，弹出图 12-16 所示的“编辑材料”对话框，选择“通用”选项下的“密度”，定义“质量密度”值为“7850”，再选择线弹性材料，输入“杨氏模量”与“泊松比”如图 12-17 所示。单击“确定”完成材料的创建。

（6）单击按钮，弹出图 12-18 所示的“创建截面”对话框，选择实体均质截面，单击“继续”按钮，弹出图 12-19 所示的“编辑截面”对话框，“材料”选择“Steel”，单击“确定”按钮完成截面创建。

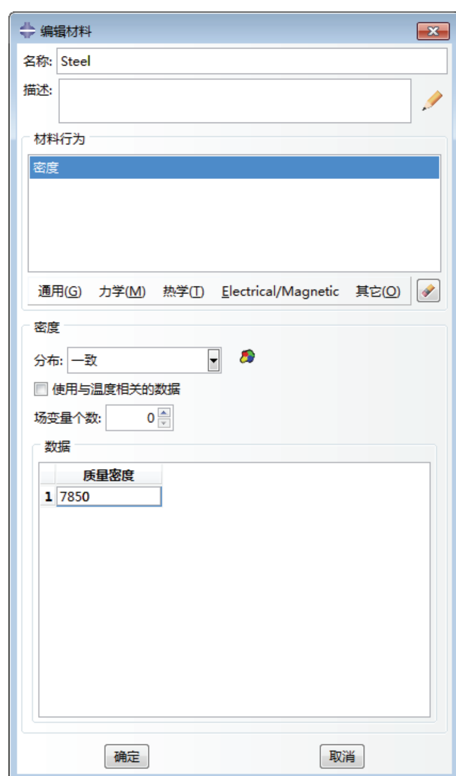


图 12-16 “编辑材料”对话框

数据

	杨氏模量	泊松比
1	2.06E11	0.27

图 12-17 线弹性材料数据

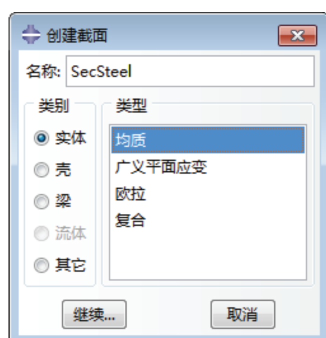


图 12-18 “创建截面”对话框



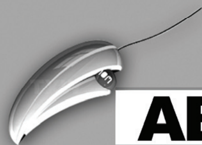
图 12-19 “编辑截面”对话框

（7）单击按钮，拾取模型，单击中键完成截面指派。

也可以直接在部件模块中把截面与材料先声明好。

```
** Section: SecSteel
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel
```

（8）进入装配模块，单击按钮，弹出图 12-20 所示的“创建实例”对话框，选择联轴器模型，单击“确定”完成实例化如图 12-21 所示。



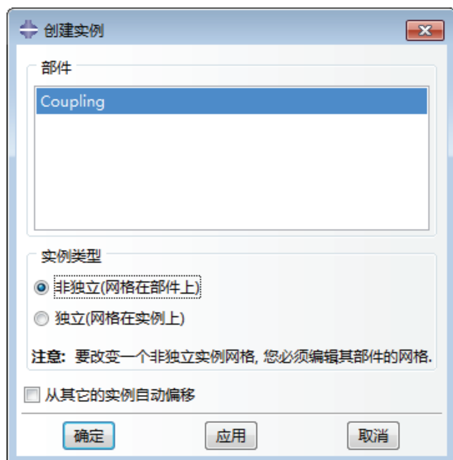


图 12-20 “创建实例”对话框

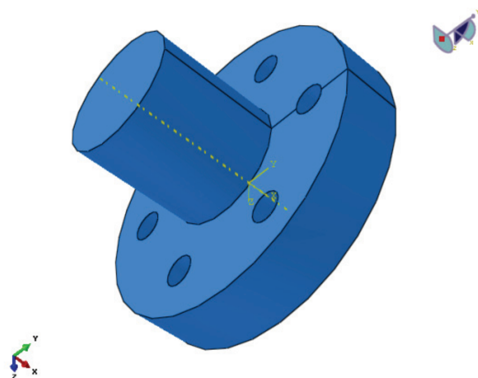


图 12-21 实例化

（9）进入分析步，开始定义线性摄动分析步。使用如下命令，进行分析步定义。

```
** STEP: Modal
**  定义名为 Modal 的线性摄动分析步
*Step, name=Modal, perturbation
*Frequency, eigensolver=Lanczos, acoustic coupling=on, normalization=displacement
30, , , , ,
**
```

或者单击按钮，弹出图 12-22 所示的“创建分析步”对话框，选择“线性摄动”分析步、“频率”分析，单击“继续”按钮，弹出图 12-23 所示的“编辑分析步”对话框。



图 12-22 “创建分析步”对话框

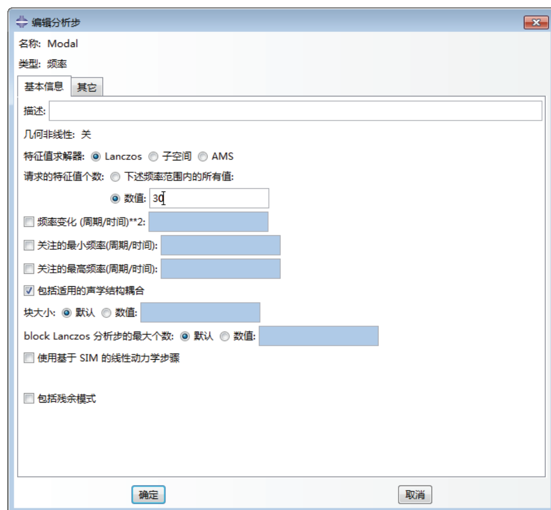


图 12-23 “编辑分析步”对话框

输入“请求的特征值个数”为“30”，单击“确定”按钮。

（10）进入“载荷”模块。单击按钮，弹出图 12-24 所示的“创建边界条件”对话

框，输入约束的名称，选择“力学”类别下的“位移/转角”，单击“继续”按钮。

拾取模型的小头端面，单击中键，弹出图 12-25 所示的“编辑边界条件”对话框。约束除了 UR1 以外的所有自由度，单击“确定”按钮完成。如下命令也可以进行约束操作。

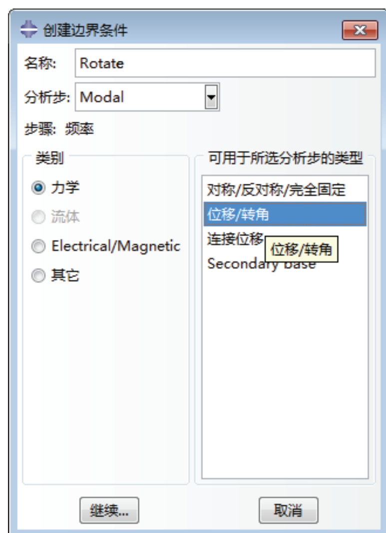


图 12-24 “创建边界条件”对话框



图 12-25 “编辑边界条件”对话框

```
** Name: Rotate Type: 位移/转角
*Boundary
Set-1, 1, 1
Set-1, 2, 2
Set-1, 3, 3
Set-1, 5, 5
Set-1, 6, 6
```

（11）在“载荷”模块中，单击按钮，弹出图 12-26 所示的“创建边界条件”对话框，输入约束的名称，选择“力学”类别下的“对称/反对称/完全固定”，单击“继续”按钮。

拾取模型的大头端面，单击中键，弹出图 12-27 所示的“编辑边界条件”对话框，选择“XSYMM（U1=UR2=UR3=0）”，单击“确定”按钮完成。完成约束的状态应如图 12-28 所示。也可以将以下命令插入在 INP 文件的“分析步”模块内。

```
** Name: Rotate Type: 位移/转角
*Boundary
Set-1, 1, 1
Set-1, 2, 2
Set-1, 3, 3
Set-1, 5, 5
Set-1, 6, 6
```

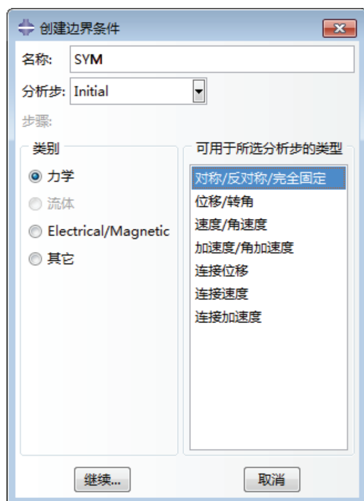


图 12-26 “创建边界条件”对话框

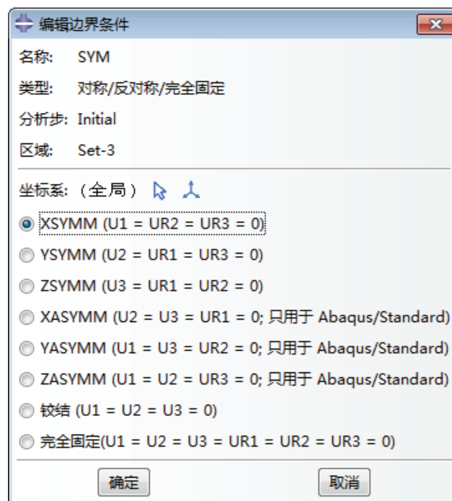


图 12-27 “编辑边界条件”对话框

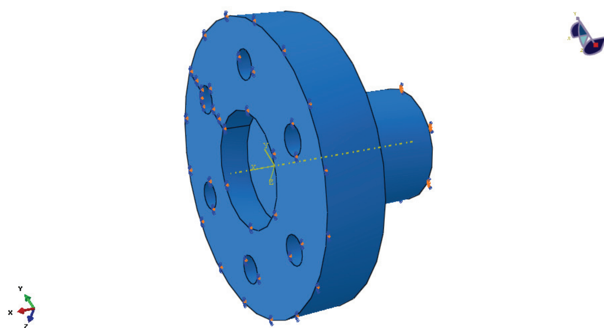


图 12-28 完成约束

以下方法也可以进行约束，但注意必须定义在“分析步”之前。

```
**创建类型为位移/转角的边界，用于控制轴的自由度
** Name: Fix Type: 位移/转角
*Boundary
Set-2, 1, 1
Set-2, 2, 2
Set-2, 3, 3
Set-2, 5, 5
Set-2, 6, 6
**定义对称约束
** Name: SYM Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary
Set-3, XSYMM
```

（12）进入“网格”模块。单击按钮，弹出图 12-29 所示的“全局种子”对话框，设置“近似全局尺寸”为“0.005”，“最大偏离因子”为“0.05”，单击“确定”按钮，完成布种如图 12-30 所示。



图 12-29 全局种子

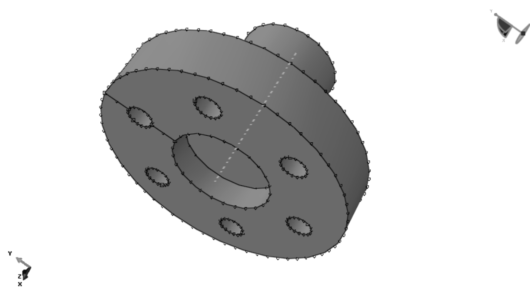


图 12-30 布种

（13）单击按钮，弹出图 12-31 所示的“网格控制属性”对话框，选择“四面体”网格，采用“自由”划分方式，单击“确定”按钮完成网格控制。

单击按钮，弹出图 12-32 所示的“单元类型”对话框，选择“C3D4”（线性四结点四面体单元），单击“确定”按钮完成。



图 12-31 “网格控制属性”对话框



图 12-32 “单元类型”对话框

（14）单击按钮，再单击中键，完成网格划分如图 12-33 所示。

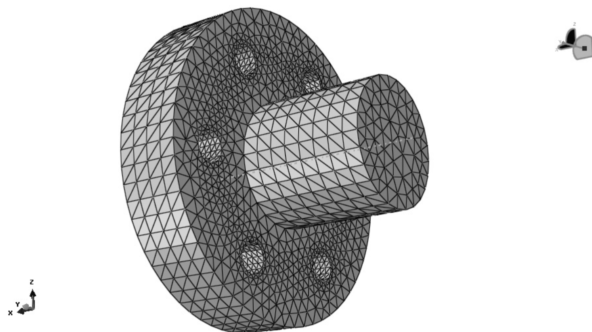


图 12-33 完成网格划分

（15）进入“作业”模块，单击按钮，弹出图 12-34 所示的“创建作业”对话框，输入作业名称，单击“继续”按钮。弹出图 12-35 所示的“编辑作业”对话框，接受默认设

置，单击“确定”按钮完成。



图 12-34 “创建作业”对话框



图 12-35 “编辑作业”对话框

（16）单击按钮，弹出“作业管理器”对话框，单击“数据检查”。当信息区显示：

“Job Modal: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job Modal: Abaqus/Standard completed successfully.
Job Modal completed successfully.”

检查通过，可以提交作业。

本例提供完整 INP 文件，可以直接进行分析，请参考光盘文件。

（17）完成分析后，进行后处理。进入“可视化”模块，单击按钮，弹出图 12-36 所示的“场输出”对话框，选择“位移”，单击按钮，弹出图 12-37 所示的“分析步/帧”对话框。



图 12-36 “场输出”对话框

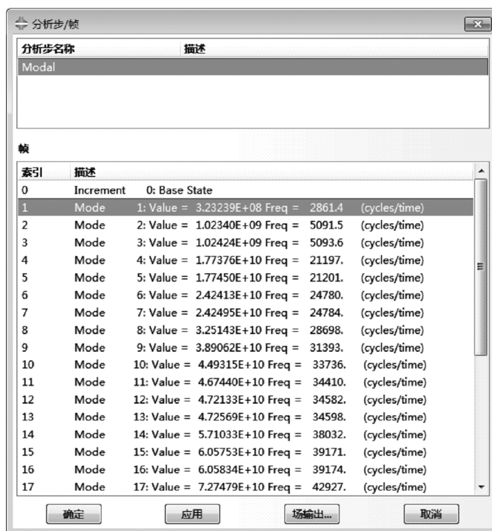


图 12-37 “分析步/帧”对话框

在图 12-37 所示的“分析步/帧”对话框列出的 30 阶模态的固有频率中，选择第一个，单击“应用”按钮，在图区中显示一阶模态的振型如图 12-38 所示。

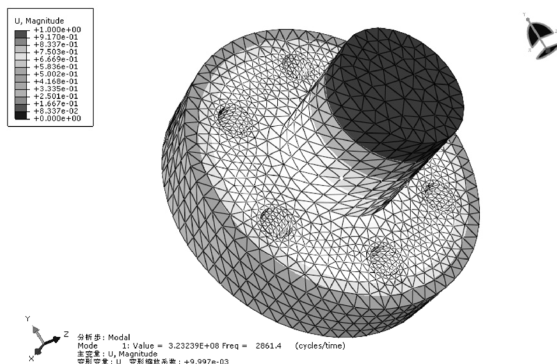


图 12-38 第 1 阶模态振型

依照同样方法进行操作，可得到图 12-39～图 12-47 所示的第 2 阶至第 10 阶模态的振型。

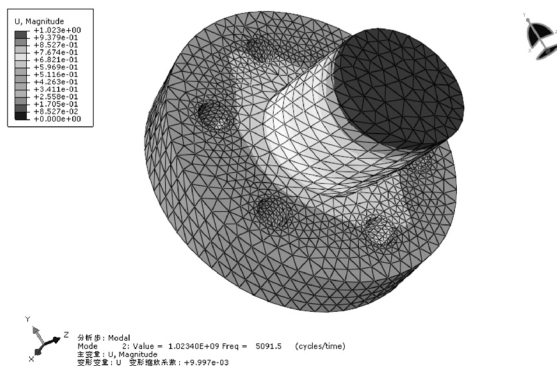


图 12-39 第 2 阶模态振型

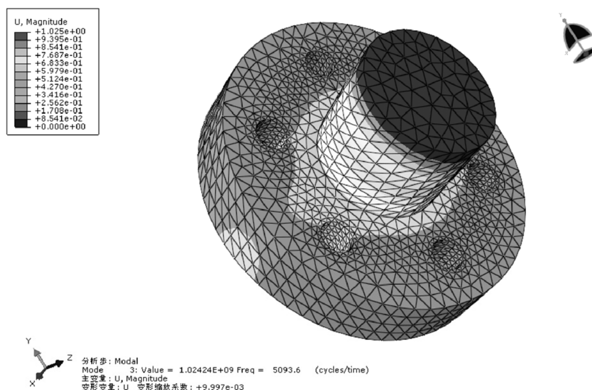
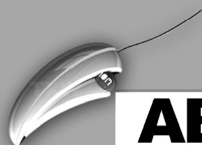


图 12-40 第 3 阶模态振型



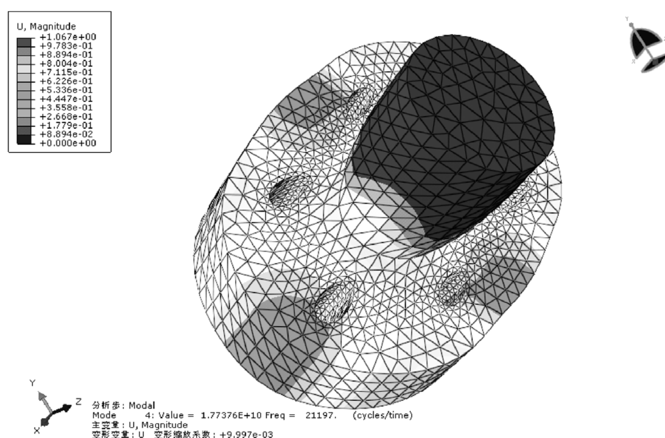


图 12-41　第 4 阶模态振型

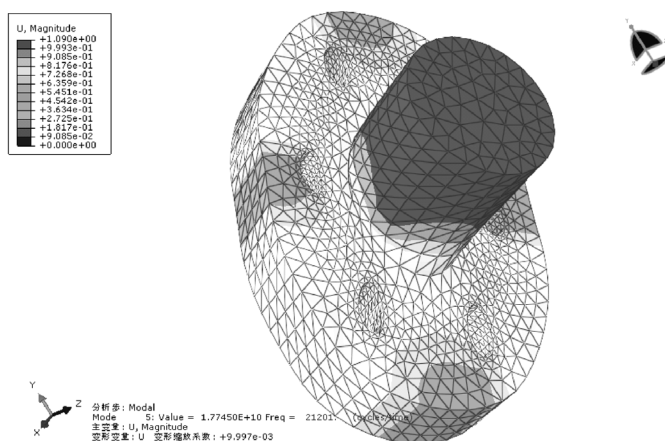


图 12-42　第 5 阶模态振型

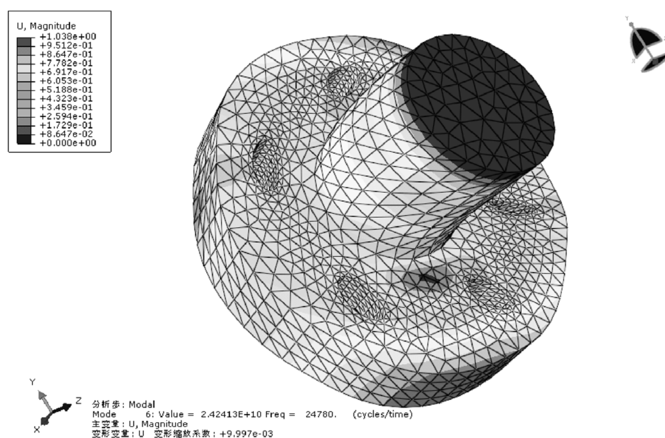


图 12-43　第 6 阶模态振型

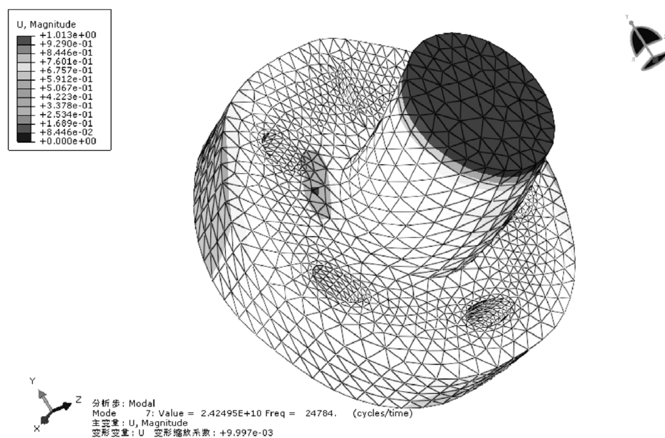


图 12-44　第 7 阶模态振型

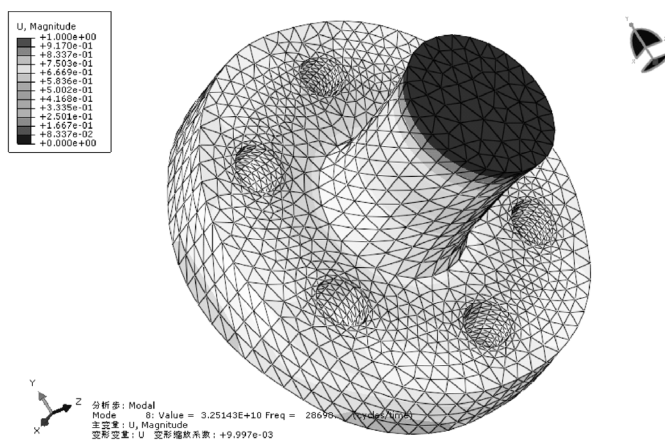


图 12-45　第 8 阶模态振型

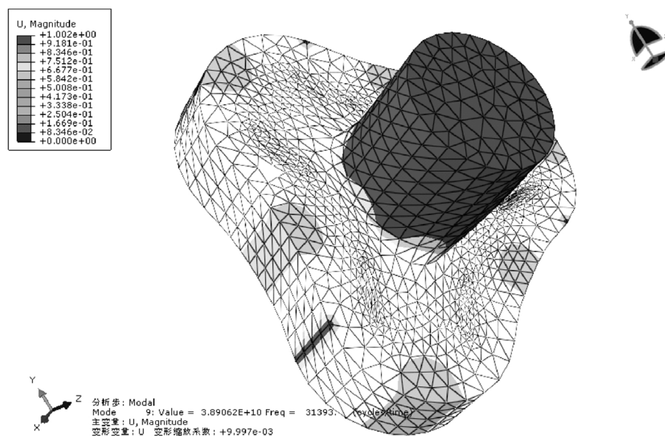


图 12-46　第 9 阶模态振型

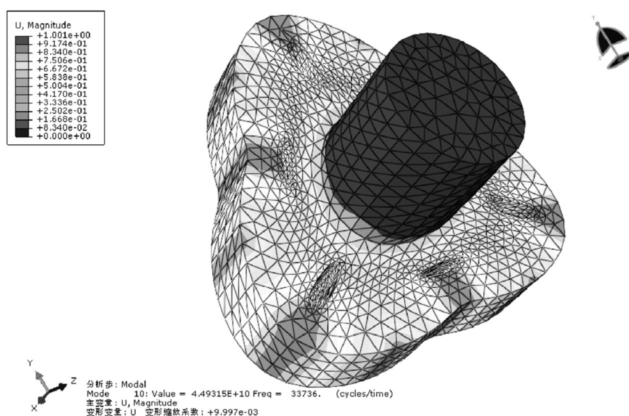


图 12-47 第 10 阶模态振型

类推可得到如图 12-48～图 12-53 所示的高阶振型。

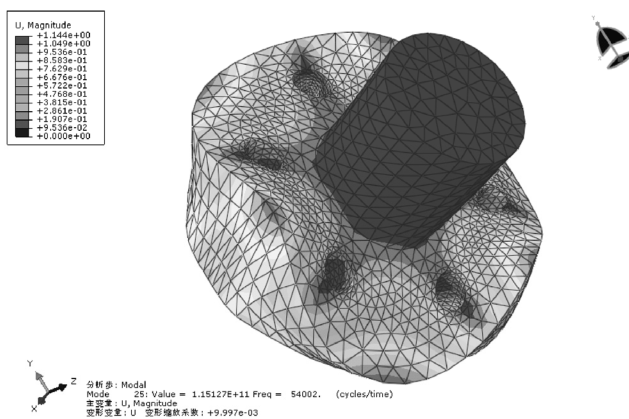


图 12-48 第 25 阶振型

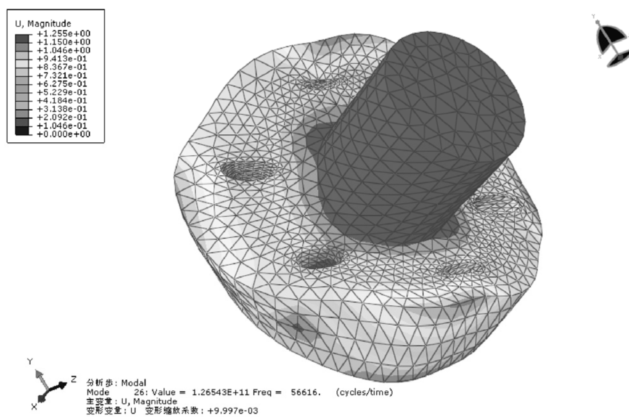


图 12-49 第 26 阶振型

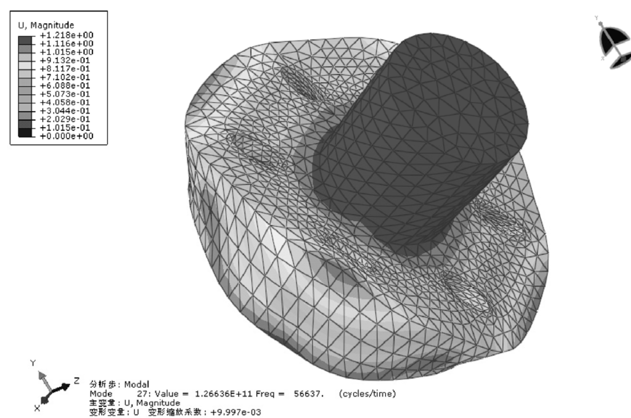


图 12-50　第 27 阶振型

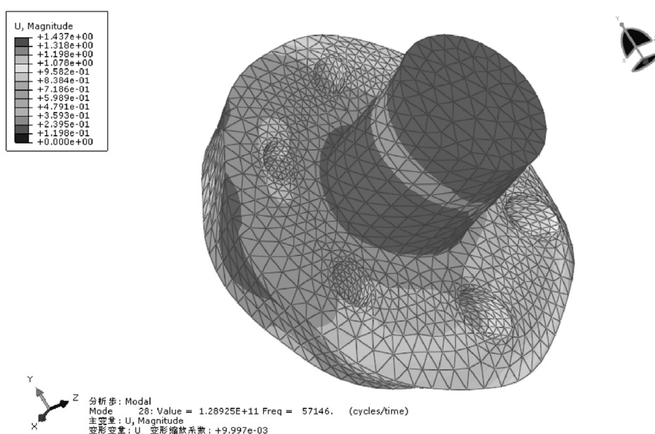


图 12-51　第 28 阶振型

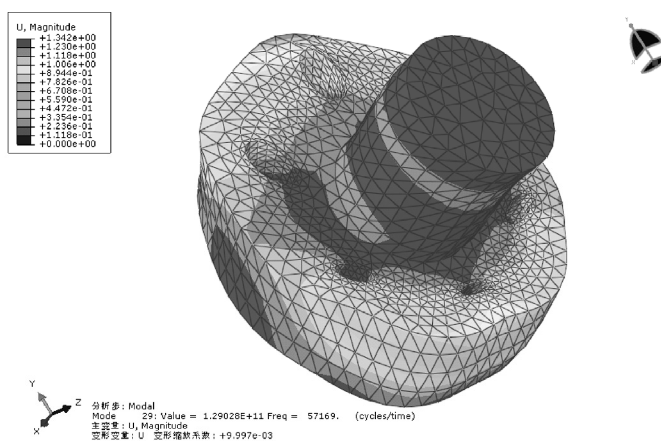


图 12-52　第 29 阶振型

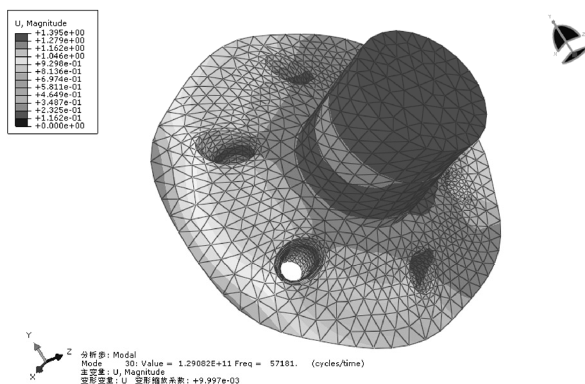


图 12-53　第 30 阶振型

在主菜单中选择“选项→通用”命令，弹出图 12-54 所示的“通用绘图选项”对话框，在“标签”选项卡中，勾选“显示结点编号”，单击“确定”按钮，显示结点编号如图 12-55 所示。



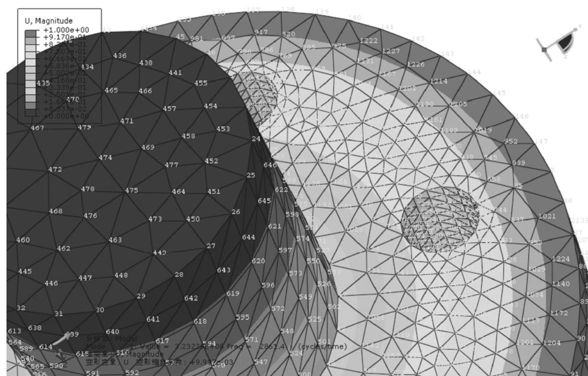


图 12-54 “通用绘图选项”对话框　　　　　　　　　图 12-55　显示结点编号

单击按钮，弹出图 12-56 所示的“创建 XY 数据”对话框，选择“ODB 场变量输出”，单击“继续”按钮，弹出图 12-57 所示的“来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框。





图 12-56 “创建 XY 数据”对话框　　图 12-57 “来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框

“变量”选项卡中，选择“唯一结点的”，勾选“U：空间位移”。切换到“单元/结点”选项卡，“结点编号”中输入“145”如图 12-58 所示，注意高亮的结点，单击“绘制”。在视图区中显示结点 145 随模态变化的位移曲线如图 12-59 所示。



图 12-58 “单元/结点”选项卡

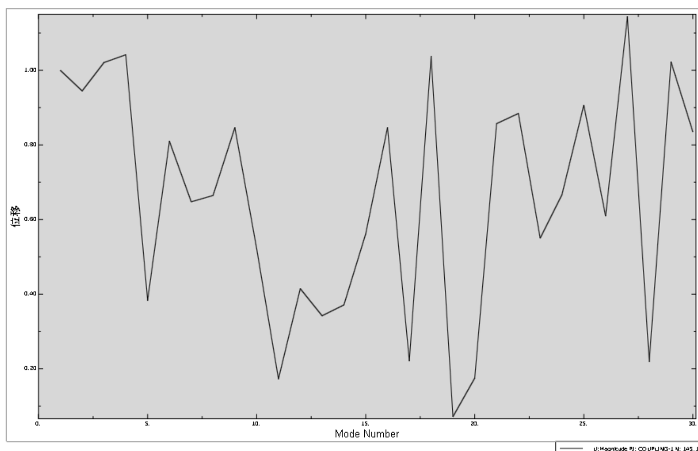


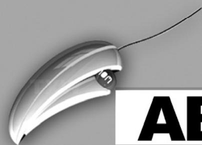
图 12-59 结点 145 随模态变化的位移曲线

12.2.2 非线性动力学问题实例——冲击与侵彻

在机械、军工等领域，冲击碰撞是一种非常常见的现象，如汽车碰撞试验、子弹穿甲及叶片脱落等。本节实例是对此类现象发生过程的模拟。非线性动力学分析对于事故预防分析有重要的意义。

如图 12-60 所示为钢球和圆形钢板模型，钢球的半径为 0.05m，钢板的半径为 0.25m，厚度为 0.05m，假设钢球以垂直于钢板 500m/s 的速度、平行于钢板 1000m/s 的速度冲击钢板，冲击时间为 4E-5s，分析钢板对钢球冲击的响应。

（1）启动 ABAQUS/CAE，单击按钮，弹出图 12-61 所示的“创建部件”对话框，



“类型”选择“旋转”，单击“继续”按钮，在草图中绘制如图 12-62 所示的草图。

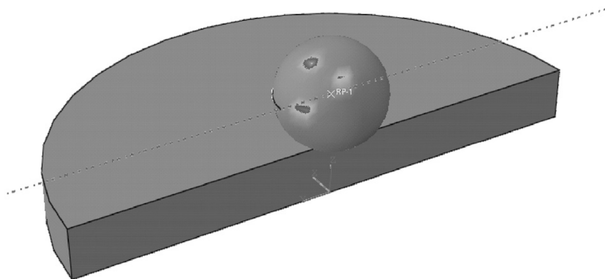


图 12-60　钢球和钢板模型（钢板只取一半）



图 12-61 “创建部件”对话框

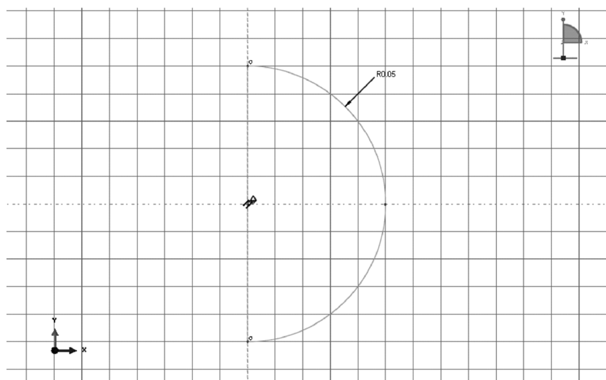


图 12-62　草图

（2）完成草图后单击中键，弹出图 12-63 所示的“编辑旋转”对话框，设置旋转“角度”为“360”，单击“确定”按钮，生成如图 12-64 所示的模型。



图 12-63 “编辑旋转”对话框

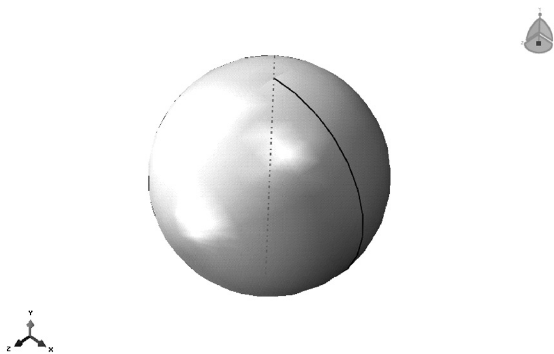


图 12-64　旋转完成

（3）单击按钮，弹出图 12-65 所示的“创建部件”对话框，“类型”选择“拉伸”，单击“继续”，在草图中绘制如图 12-66 所示的草图。



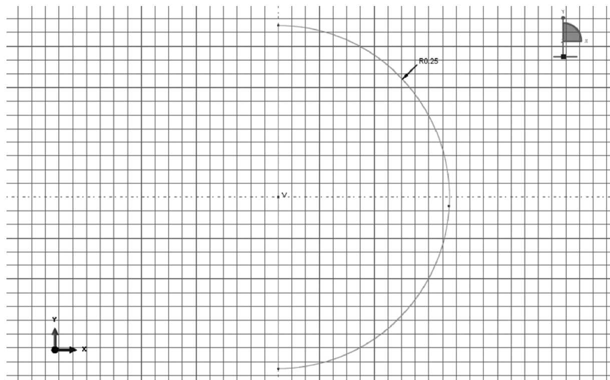


图 12-65 “创建部件”对话框　　　　图 12-66 草图

（4）完成草图后单击中键，弹出图 12-67 所示的“编辑基本拉伸”对话框，设置“深度”为“0.05”，单击“确定”，生成如图 12-68 所示的模型。



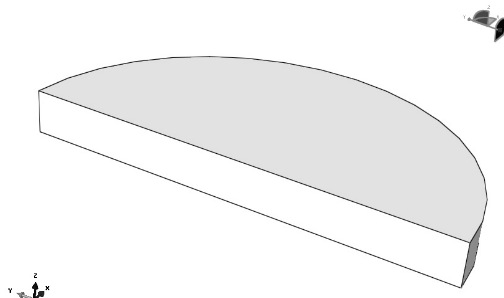


图 12-67 “编辑基本拉伸”对话框　　　　图 12-68 拉伸完成

（5）进入“属性”模块，单击，弹出图 12-69 所示的“编辑材料”对话框，选择“通用”下的“密度”，定义“质量密度”为“7800”，再选择线弹性材料，按图 12-70 输入“杨氏模量”与“泊松比”，单击“确定”完成材料的创建。

也可在“关键字编辑器”中使用如下命令。

```
**Ball 部件的材料，线弹性材料参数与密度在此定义
*Material, name=Steel_Ball
*Density
7800.,
*Elastic
 2.068e+11, 0.3
```



图 12-69 “编辑材料”对话框

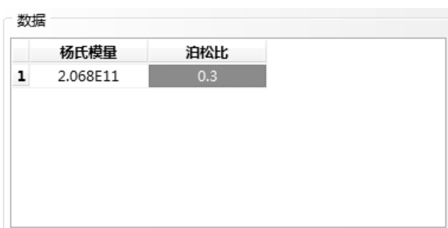


图 12-70 线弹性材料数据

（6）单击，弹出图 12-71 所示的“编辑材料”对话框，选择“通用”下的“密度”，定义“质量密度”为“7800”，再选择线弹性材料，按图 12-72 输入“杨氏模量”与“泊松比”，单击“确定”完成材料的创建。



图 12-71 “编辑材料”对话框



图 12-72 线弹性材料数据

再选择“力学”下的“塑性”，输入屈服应力、塑性应变数据如图 12-73 所示。

再选择主菜单中的“模型→编辑关键字”命令，弹出“关键字编辑器”，在 Material 块后再添加一个块，输入如下文字。

```
*Share Failure
1.0
```

如图 12-74 所示，单击“确定”完成。



图 12-73 塑性材料参数

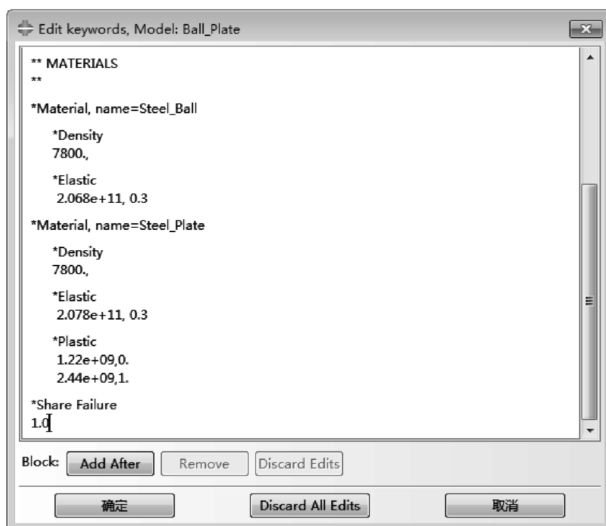


图 12-74 编辑关键字

也可以使用如下命令。

```
**Plate 部件的材料，线弹性材料、塑性参数、密度、失效模式在此定义
*Material, name=Steel_Plate
*Density
7800.,
*Elastic
 2.078e+11, 0.3
*Plastic
 1.22e+09,0.
 2.44e+09,1.
*Share Failure
1.0
**
```

（7）参考前面的章节，完成两个材料对应截面的创建，均为均质实体截面，并将 Steel_Ball 对应的截面指派给部件 Ball，将 Steel_Plate 对应的截面指派给部件 Plate。

或者在“部件”模块中使用如下命令。

```
*Nset, nset=Set-1, generate
 1,2990,1
*Elset, elset=Set-1, generate
 1,2852,1
** Section: SecBall
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel_Ball
,
*Nset, nset=Set-1, generate
 1,4950,1
```

```
*Elset, elset=Set-1, generate
 1,4160,1
** Section: SecPlate
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel_Plate
,
```

（8）进入“装配”模块，单击“创建实例”按钮，弹出图 12-75 所示的“创建实例”对话框，完成两个部件的实例化如图 12-76 所示。



图 12-75 “创建实例”对话框

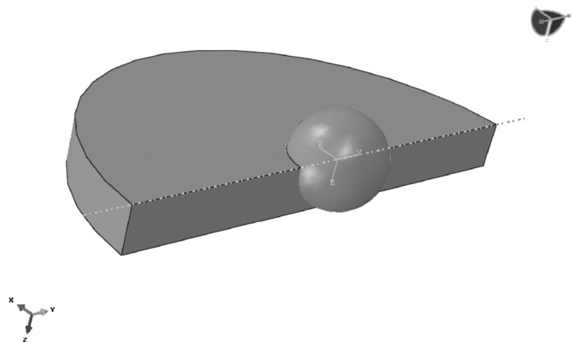


图 12-76 实例化

（9）单击按钮，拾取球体，单击中键，接受默认的起点坐标，单击中键，输入平移矢量的终点坐标为“0，0，0.1”，单击中键完成平移如图 12-77 所示。

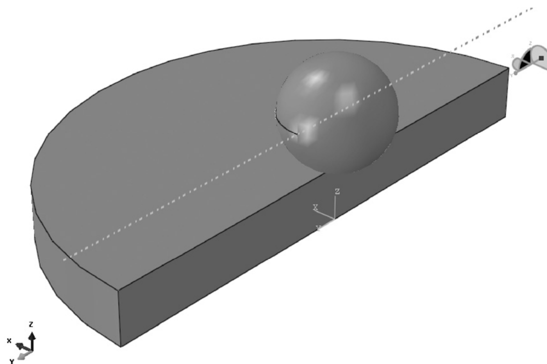


图 12-77 将球平移

（10）进入“分析步”模块，单击按钮，弹出图 12-78 所示的“创建分析步”对话框，输入分析步名称，选择“通用”分析步中的“动力，显式”。

单击“继续”，弹出图 12-79 所示的“编辑分析步”对话框，输入“时间长度”为“4E-5”，单击“确定”完成分析步的创建。

或者采用如下方式也可以。

```
*进入分析步，创建显式动态分析步
** STEP: Dynamic
```

```
**
*Step, name=Dynamic
*Dynamic, Explicit
, 4e-05
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
```



图 12-78 “创建分析步”对话框

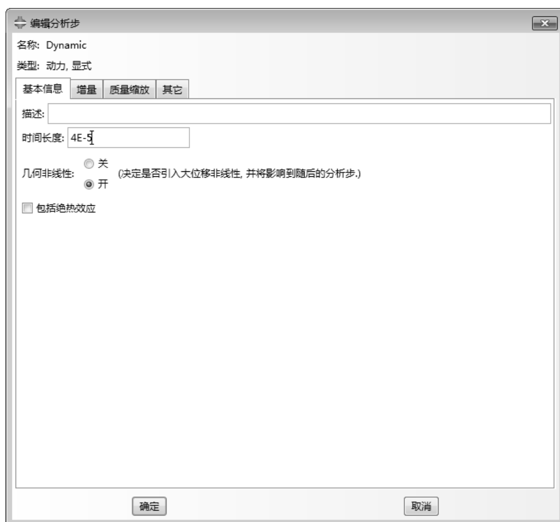


图 12-79 “编辑分析步”对话框

（11）进入“相互作用”模块，在此模块中定义接触。

单击按钮，弹出图 12-80 所示的“创建相互作用属性”对话框，输入相互作用的名称，“类型”选择“接触”。

单击“继续”，弹出图 12-81 所示的“编辑接触属性”对话框，直接单击“确定”，完成一个无摩擦的接触属性的定义。



图 12-80 “创建相互作用属性”对话框



图 12-81 “编辑接触属性”对话框

```
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=Contact
```

由于本例使用默认选项，因此命令比较简单。

（12）选择菜单栏中的“工具→参考点”命令，或者单击按钮拾取球心点，单击中键，创建一个位于球心的参考点。

（13）单击按钮，弹出图 12-82 所示的“创建约束”对话框，选择“刚体”，单击“继续”。

弹出图 12-83 所示的“编辑约束”对话框，区域类型中选择“体（单元）”，单击按钮，拾取球体单击中键，使用上一次创建的点作为参考点，再单击“确定”，将球体定义为刚体。



图 12-82 “创建约束”对话框



图 12-83 “编辑约束”对话框

或者可以使用如下命令。

```
**定义球的刚体约束
** Constraint: RigidBall
*Rigid Body, ref node=_PickedSet8, elset=b_Set-1
**
```

（14）返回“部件”模块，进入 Plate 部件的定义。使用菜单栏中的“工具→分区”命令，弹出图 12-84 所示的“创建分区”对话框。

选择“几何元素→草图平面分区”，在视图区中拾取一个半圆，再拾取它的直径，进入草图，绘制如图 12-85 所示的半圆。

单击中键，模型如图 12-86 所示，在图 12-84 所示的“创建分区”对话框选择“拉伸/扫掠边”，拾取图 12-87 所示的封闭曲线。

单击中键，选择“沿某条边扫掠”，拾取图 12-88 所示的边，单击中键，完成分区如图 12-89 所示。

（15）单击按钮，弹出图 12-90 所示的“创建相互作用”对话框，选择“表面与表面接触（Explicit）”，单击“继续”。

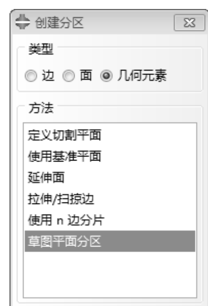


图 12-84 “创建分区”对话框

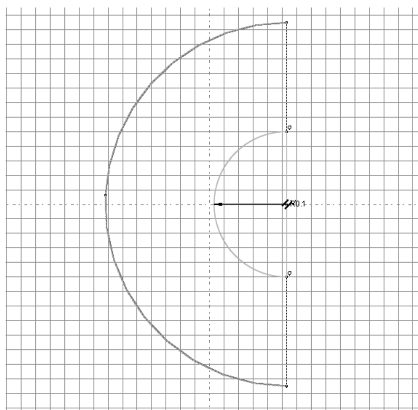


图 12-85 绘制半圆

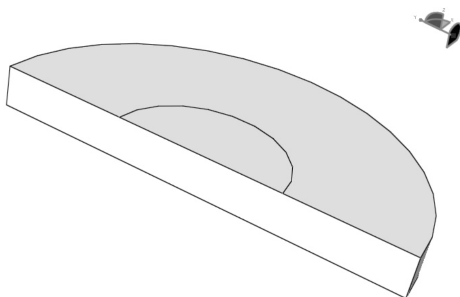


图 12-86 平面分区

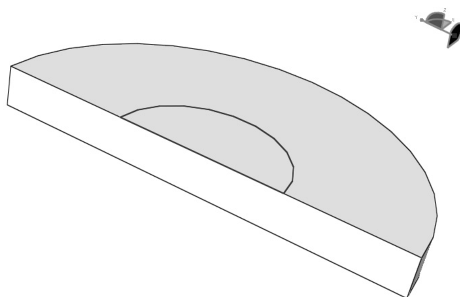


图 12-87 用于扫掠的边

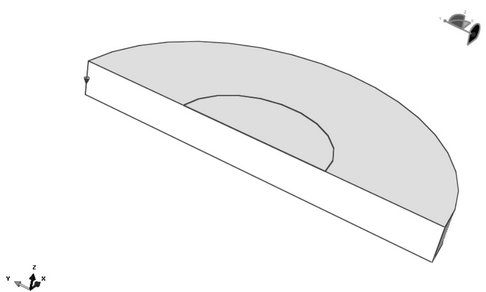


图 12-88 扫掠方向

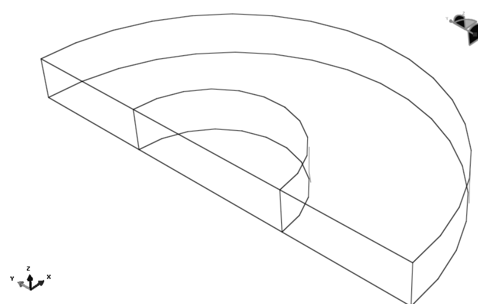


图 12-89 完成分区

选择球面为主表面，第二表面为钢板上的分区部分，单击中键，弹出图 12-92 所示“编辑相互作用”对话框。接受默认设置，单击“确定”完成。

也可以使用如下命令。

```
** Interaction: B_P
*Contact Pair, interaction=Contact, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=B_P
m_Surf-1, s_Set-3_CNS_
```

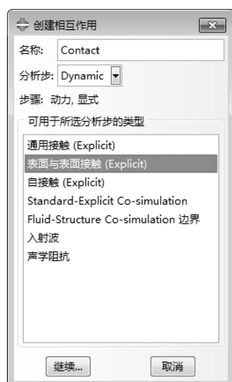


图 12-90 “创建相互作用”对话框

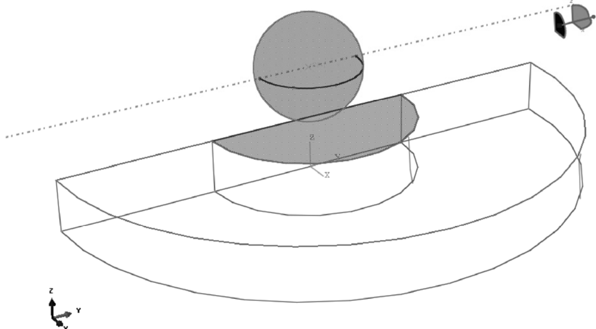


图 12-91 接触面

（16）进入“载荷”模块，单击按钮，弹出图 12-93 所示的“创建边界条件”对话框，选择“对称/反对称/完全固定”，单击“继续”，拾取图 12-94 所示的面。



图 12-92 “编辑相互作用”对话框



图 12-93 “创建边界条件”对话框

单击中键，弹出图 12-95 所示的“编辑边界条件”对话框，选择“完全固定（U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0）”，单击“确定”，固定的模型如图 12-96 所示。

（17）重复上述操作，为钢板的对称面添加 X 方向的对称约束。在命令中，这种操作更为简单。

```
**定义边界，固定钢板的圆周，并定义对称约束
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC_FIX Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary
Set-7, ENCASTRE
** Name: XSYM Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary
```

Set-5, XSYMM
**

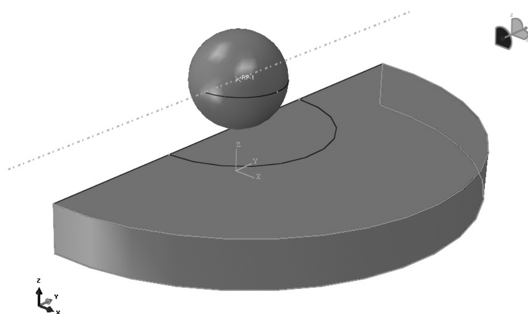


图 12-94　拾取的面



图 12-95　“编辑边界条件”对话框

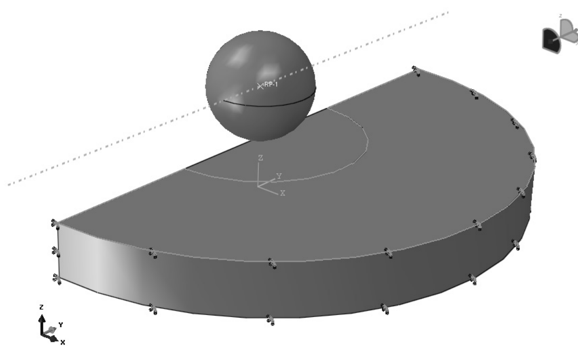


图 12-96　固定约束

（18）单击按钮，弹出图 12-97 所示的“创建预定义场”对话框，选择“分析步”为“Initial”，“类别”为“力学”，“可用于所选分析步的类型”为“速度”，单击“继续”，拾取球，单击中键，弹出图 12-98 所示的“编辑预定义场”对话框。

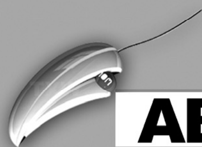
按图 12-98 输入各方向的速度，单击“确定”。

在命令中，实现这个操作较为简单，只要将以下命令放在 STEP 之前就可以。

```
**预定义场，给 Ball 部件定义初速度
** Name: VelocityType: Velocity
*Initial Conditions, type=VELOCITY
Set-6, 1, 0.
Set-6, 2, 1000.
Set-6, 3, -500.
```

（19）进入“网格”模块，单击，按图 12-99 所示的边的单元数为各边布种。完成边的布种的模型如图 12-100 所示。

单击按钮，为平板指派 C3D8R 单元。单击按钮，完成钢板的划分如图 12-101 所示。



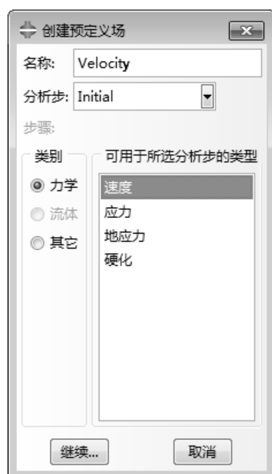


图 12-97 “创建预定义场”对话框



图 12-98 “编辑预定义场”对话框

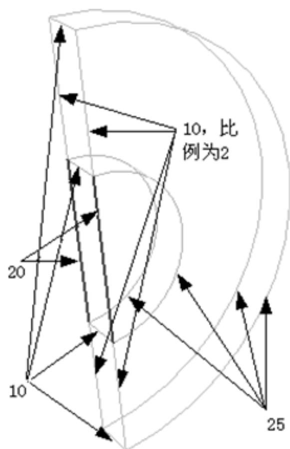


图 12-99 各边单元数

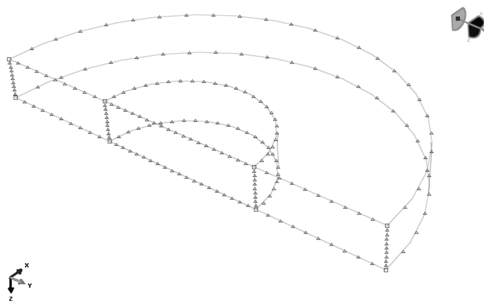


图 12-100 完成边的布种

（20）切换到 Ball 部件，单击按钮，弹出图 12-102 所示的“网格控制属性”对话框，将单元改为“以六面体为主”。再单击按钮将球划分，如图 12-103 所示。

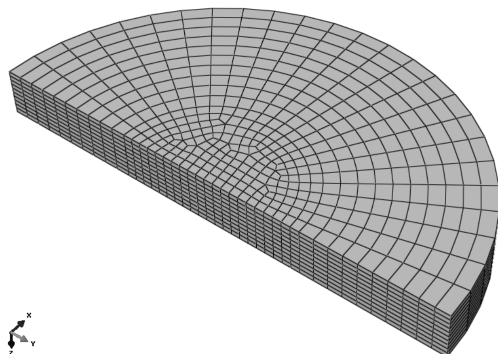


图 12-101 Plate 部件的单元



图 12-102 “网格控制属性”对话框

（21）单击按钮，拾取整个模型的网格，弹出图 12-104 所示的“检查网格”，单击“高亮”。

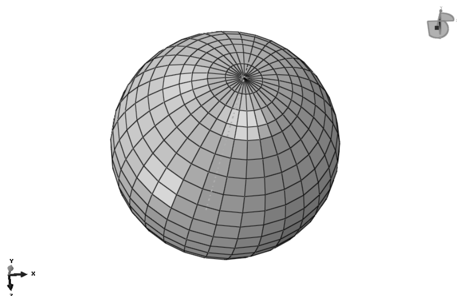


图 12-103　Ball 部件的单元



图 12-104　“检查网格”对话框

在信息区显示如下信息：

“部件实例: Ball-1
单元数:2852,分析错误:0 (0%),分析警告:0 (0%)

部件实例: Plate-1
单元数 :4160,分析错误:0 (0%),分析警告:0 (0%)”

即网格无错误，可以进入分析。

（22）单击按钮，弹出图 12-105 所示的“创建作业”对话框，输入作业名称，单击“继续”，弹出图 12-106 所示的“编辑作业”对话框，接受默认设置，单击“确定”完成作业的创建。



图 12-105　“创建作业”对话框



图 12-106　“编辑作业”对话框

提交检查之前，先在“关键字编辑器”中输入如下命令。

```
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
```

```
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
A, RF, U, V
*Element Output, directions=YES
EVF, LE, PE, PEEQ, PEEQVAVG, PEVAVG, S, SVAVG
*Contact Output
CFORCE, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

完成对输出请求的修改。

（23）单击按钮，弹出“作业管理器”对话框，单击“写入输入文件”，再单击“数据检查”。信息区中显示：

“作业输入文件 "Penetration.inp" 已提交分析。
Job Penetration: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job Penetration: Abaqus/Explicit Packager completed successfully.
Job Penetration: Abaqus/Explicit completed successfully.
Job Penetration completed successfully.”

说明检查通过，可以提交分析，单击“提交”即可。

本例提供完整的 INP 文件，详见光盘文件。

（24）完成分析后，进入“可视化”模块进行后处理。

单击，选择“主变量”下的位移，如图 12-107 所示，单击“确定”，在视图区中显示位移云图如图 12-108 所示。



图 12-107　选择主变量下的平移

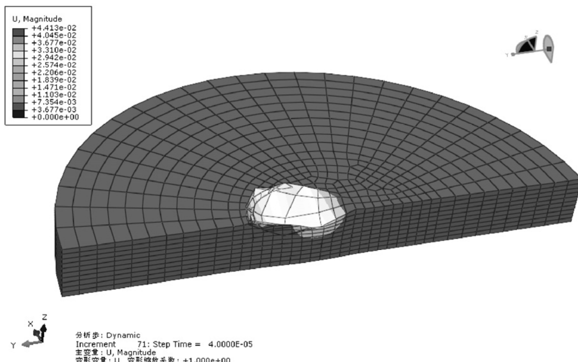


图 12-108　空间位移云图

单击，选择“主变量”下的应力，如图 12-109 所示，单击“确定”，在视图区中显示应力云图如图 12-110 所示。



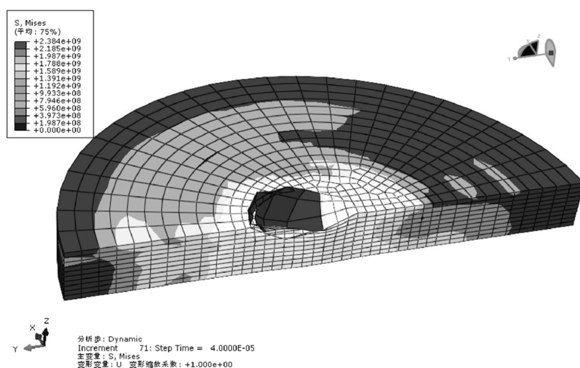


图 12-109 选择主变量下的应力　　　图 12-110 应力云图

单击，选择“主变量”下的加速度，如图 12-111 所示，单击“确定”，在视图区中显示加速度云图如图 12-112 所示。



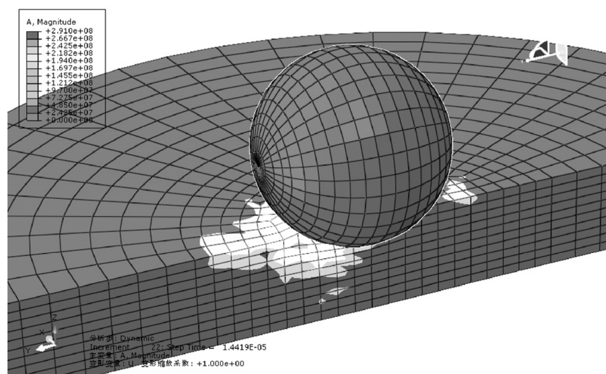


图 12-111 选择主变量下的加速度　　　图 12-112 加速度云图

单击，选择“主变量”下的速度，如图 12-113 所示，单击“确定”，在视图区中显示速度云图如图 12-114 所示。



图 12-113　选择主变量下的速度

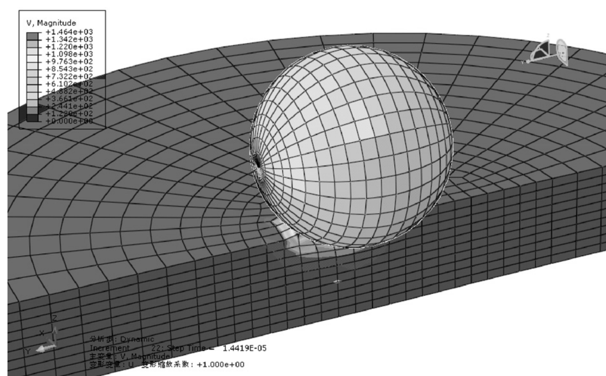


图 12-114　速度云图

单击 ，选择“主变量”下的塑性应变，如图 12-115 所示，单击“确定”，在视图区中显示塑性应变云图如图 12-116。



图 12-115　选择主变量下的塑性应变

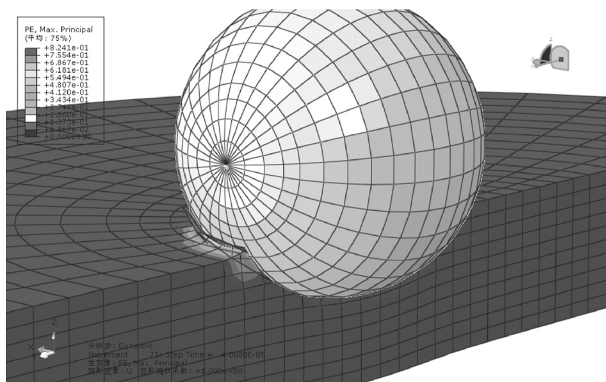


图 12-116　塑性应变云图

单击 ，选择“主变量”下的反作用力，如图 12-117 所示，单击“确定”，在视图区中显示反作用力云图如图 12-118 所示。

单击 ，选择“符号变量”下的加速度，如图 12-119 所示，单击“确定”，在视图区中

显示加速度符号如图 12-120 所示。



图 12-117　选择主变量下的反作用力

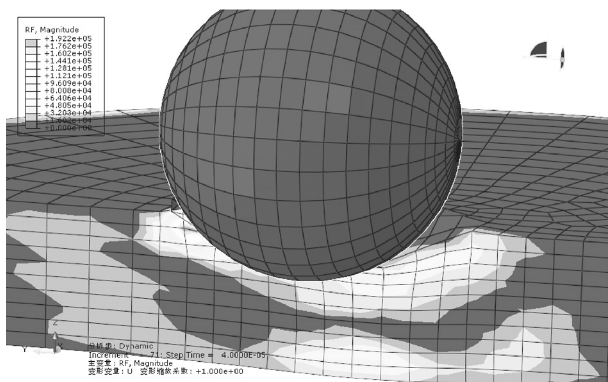


图 12-118　反作用力云图



图 12-119　选择符号变量下的加速度

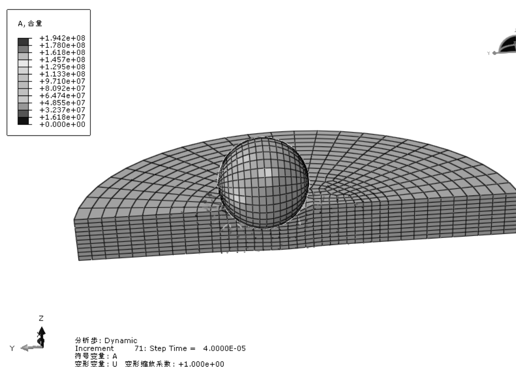


图 12-120　加速度符号

单击，选择“符号变量”下的反作用力，如图 12-121 所示，单击“确定”，在视图区中显示反作用力符号图如图 12-122 所示。

单击，选择“符号变量”下的应力，如图 12-123 所示，单击“确定”，在视图区中显示应力符号图如图 12-124 所示。



图 12-121　选择符号变量下的反作用力

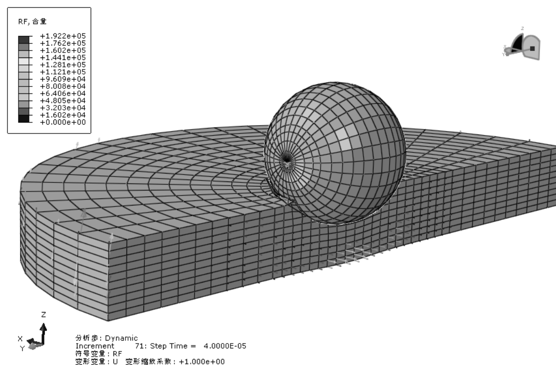


图 12-122　反作用力符号



图 12-123　选择符号变量下的应力

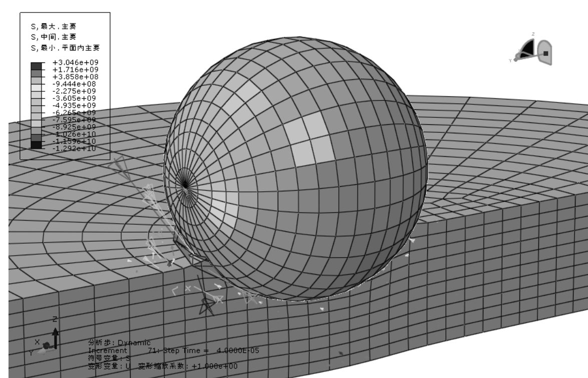


图 12-124　应力符号

单击，选择“符号变量”下的位移，如图 12-125 所示，单击“确定”，在视图区中显示位移符号图如图 12-126 所示。

单击，选择“符号变量”下的速度，如图 12-127 所示，单击“确定”，在视图区中显示速度符号图见图 12-128。



图 12-125　选择符号变量下的位移

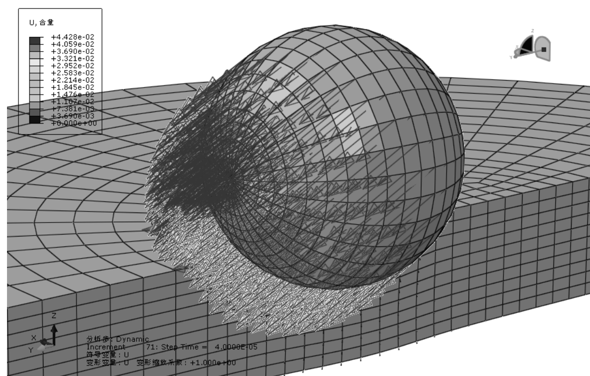


图 12-126　位移符号



图 12-127　选择符号变量下的速度

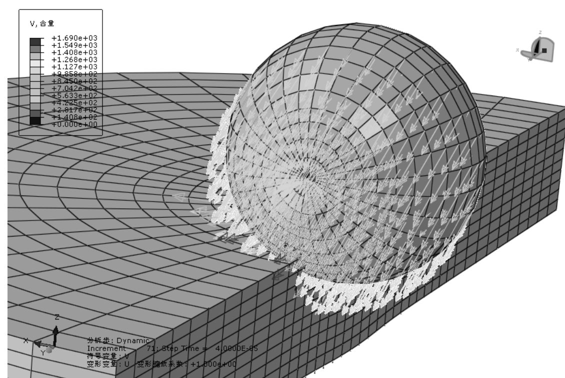


图 12-128　速度符号

单击按钮，弹出图 12-129 所示的“创建 XY 数据”对话框，选择“ODB 历程变量输出”，单击“继续”，弹出图 12-130 所示的“历程输出”对话框。

选择“Artificial Strain energy: ALLAE for Whole Model”，即全模型的名义应变能，单击

“绘制”，得到应变能曲线如图 12-131 所示，选择“Internal energy: ALLIE for Whole Model”，绘制出内能曲线如图 12-132 所示。



图 12-129 “创建 XY 数据”对话框

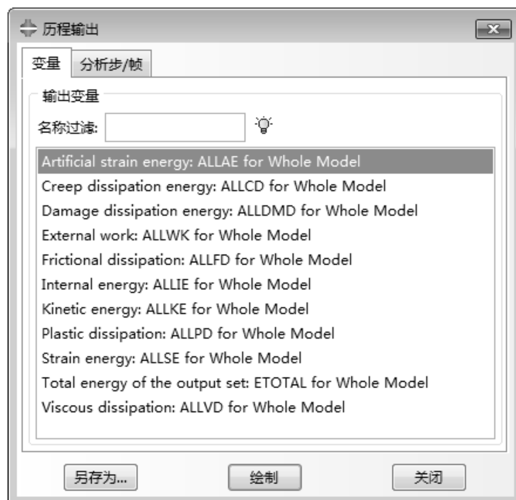


图 12-130 “历程输出”对话框

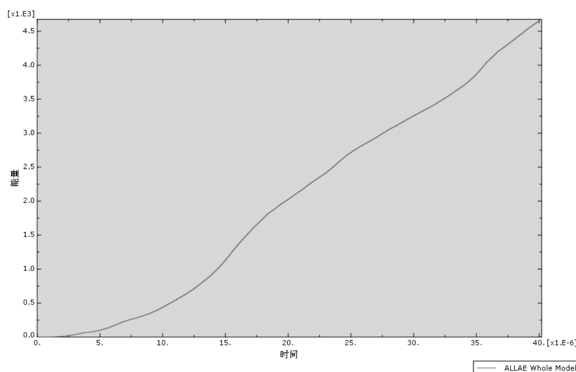


图 12-131 名义应变能曲线

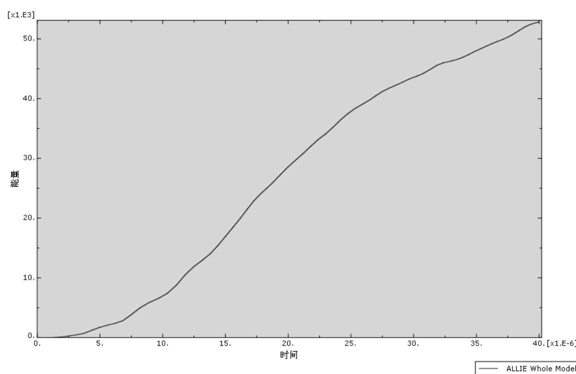


图 12-132 内能曲线

选择“Kinetic energy: ALLKE for Whole Model”，即全模型的动能，单击“绘制”，得到动能曲线如图 12-133 所示，选择“Plastic dissipation: ALLPD for Whole Model”，绘制出塑性耗散能曲线如图 12-134 所示。

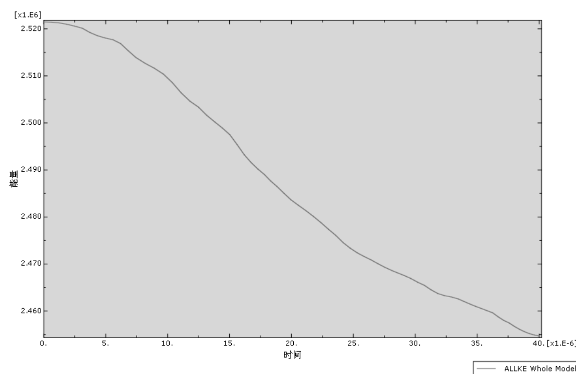


图 12-133　动能曲线

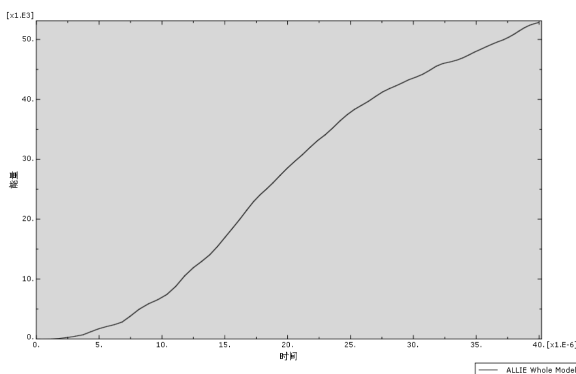


图 12-134　塑性耗散能曲线

选择“Strain energy: ALLSE for Whole Model”，即全模型的应变能，单击“绘制”，得到应变能曲线如图 12-135 所示，选择“Viscous dissipation: ALLVD for Whole Model”，绘制出粘性耗散能曲线如图 12-136 所示。

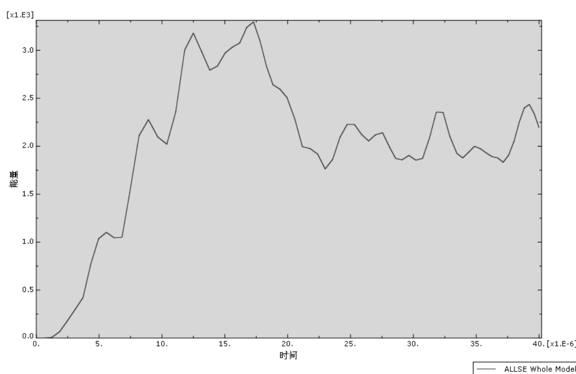


图 12-135　应变能曲线

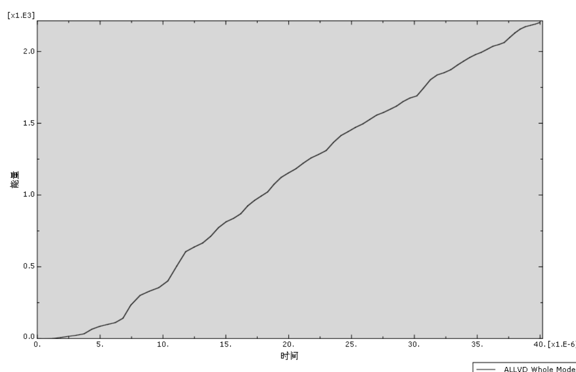


图 12-136　粘性耗散能曲线

12.3　本章小结

动力分析包括了结构的惯性效应。

频率提取程序可提取结构的自振频率和振型。

通过振型叠加技术，可用振型确定线性系统的动力响应，但是这种方法不能用于非线性问题。

线性动力分析程序可以计算瞬态载荷下的瞬态响应、谐波载荷下的稳态响应、支座运动的峰值响应以及随机载荷的响应。

为了准确表现结构的动力特性，必须提取足够多的振型。运动方向上总的模态有效质量应占结构总的可运动质量的 90%以上。

用户可以定义直接模态阻尼、瑞利阻尼和复合模态阻尼。但是由于固有频率和振型的计算都是基于无阻尼的结构，所以只能分析低阻尼的结构。

模态技术不适用于非线性的动力分析。在这类分析中必须采用直接时间积分方法。

用振幅曲线可以定义任意的随时间变化的载荷和给定的边界条件。

振型和瞬态结果可以在 ABAQUS/CAE 的“可视化”（Visualization）模块中用动画显示。这对于理解动力响应是十分有帮助的。

第 13 章　接触问题分析



许多工程问题涉及两个或多个部件间的接触。在这类问题中，彼此接触的两个物体间存在沿接触面法向的相互作用力。如果接触面间存在摩擦，沿接触面的切线方向也会产生剪力以抵抗物体间切向运动（滑动）。通常接触模拟的目标是确定接触面积及计算所产生的接触压力。

本章学习目标

- 掌握接触问题的基本概念
- 掌握接触问题中涉及的相关知识
- 掌握 ABAQUS 中定义接触的方法
- 掌握进行一般接触分析的方法
- 掌握刚性接触问题求解的方法

13.1　接触问题概述

在有限元中，接触条件是一类特殊的不连续的约束，它允许力从模型的一部分传递到另一部分。当两个表面接触时产生接触作用，当两个接触的面分开时，就不再存在约束作用，所以这种约束是不连续的。因此，分析方法必须能够判断什么时候两个表面是接触的并且采用相应的接触约束。同样，分析方法也必须能判断什么时候两个表面分开并解除接触约束。

在 ABAQUS 接触分析过程中，必须在模型的各个部件上创建可能接触的面。一对彼此可能接触的面，称为接触对，必须被标识。最后必须定义各接触面服从的本构模型。这些接触面间的相互作用的定义包括摩擦等行为。

13.1.1　接触面间的相互作用

接触面之间的相互作用包含两个部分：一部分是接触面的法向作用，另一部分是接触面的切向作用。切向部分包括接触面间的相对运动（滑动）和可能的摩擦剪应力。

■ 接触面法向性质

两个面之间分开的距离称为间隙。当两个面之间的间隙变为零，接触约束就起作用了。在接触问题的公式中，对接触面之间相互传递接触压力的大小未作任何限制。当接触压力变为零或负值时，接触面分离，约束就被撤出。这个行为称为“硬”接触。图 13-1 中的接触压力-间隙关系中描述了这种行为。

当接触条件从“开”（正的间隙）到“闭”（间隙为零）时，接触压力发生剧烈的变化，有时使得接触计算很难完成。进一步的信息可参阅用户手册的相关章节。

■ 表面的滑动

除了要确定在某一点是否发生接触外，分析中还必须计算两个表面间的相互滑动关系。

这个问题可能是一个很复杂的计算。因此，在分析时 ABAQUS 对小滑移量和有限滑动量作了区分。其中，接触面间小滑移量问题的计算量较小。“小滑移”通常很难定义，但一般所遵循的原则是，当一点与一表面接触时，只要这点滑动量不超过一个典型的单元尺度的很小部分，就可以近似地认为是“小滑移”。

■ 摩擦

当表面接触时，就像传递法向力一样，接触面间也可以传递切向力。所以分析时需要考虑阻止面之间相对滑动趋势的摩擦力。库仑摩擦是常用的描述接触面的相互作用的摩擦模型。这个模型用摩擦系数 μ 来描述两个表面间的摩擦行为。乘积 μp 给出了接触面之间摩擦剪应力的极限值，这里 p 是两接触面之间的接触压力。直到接触面之间的剪应力达到摩擦剪应力的极限 μp 时，接触面间才发生相对滑动。大多数表面的 μ 通常小于单位 1。图 13-2 中的实线描述了库仑摩擦模型的行为：当它们粘结在一起即剪应力小于 μp 时，表面间的相对运动（滑移）量为零。

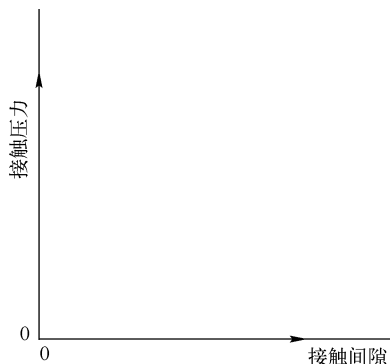


图 13-1　硬接触的接触压力与间隙的关系

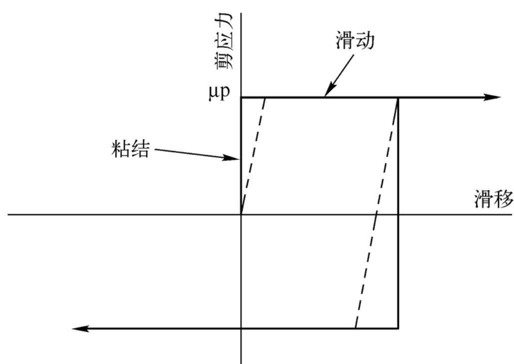


图 13-2　摩擦特性

在分析过程中，在粘结和滑移两种状态间的不连续性，可能导致收敛问题。只有在摩擦力对模型的响应有显著的影响时才应该在分析中考虑摩擦。如果在有摩擦的接触分析中出现收敛问题，首先必须尝试改进的方法之一就是在摩擦的前提下重新进行分析。

模拟真实的摩擦行为可能是非常困难的；因此在默认情况下，ABAQUS 使用一个允许“弹性滑动”的罚摩擦公式，见图 13-2 中的虚线。

“弹性滑动”是指表面粘结在一起时所发生的小量级的相对运动。ABAQUS 会自动选择罚刚度（虚线的斜率），从而这个允许的“弹性滑动”的滑动值只有单元特征长度非常小的部分那么大。

罚摩擦公式适用于大多数问题，其中包括大部分金属成型问题。对于必须包括理想的粘结-滑动摩擦行为的问题中，可以使用拉格朗日摩擦公式。

使用拉格朗日摩擦公式需要花费更多的计算机资源，其原因是在使用拉格朗日摩擦公式时 ABAQUS 需对每个摩擦接触的表面结点额外增加变量。同时，解的收敛会很慢，需要更多的迭代计算。

通常刚开始滑动时与滑动中的摩擦系数是不同的。前者称为静摩擦系数，后者称为动摩擦系数。在 ABAQUS/Standard 中用指数衰减规律来模拟静和动摩擦系数的变化。在本书中

不讨论这个摩擦公式。

在模型中考虑了摩擦，就会在求解的方程组中增添了不对称项。如果 μ 值小于 0.2，不对称项的值及其影响将非常小；一般而言，采用正规的、对称求解器法求解的效果还是很好（接触面的曲率很大除外）。

在摩擦系数较大时，会自动调用非对称求解器求解，因为它将改进收敛速度。但是，非对称求解器所需的计算机内存和硬盘空间是对称求解器的两倍。

13.1.2 在 ABAQUS 中定义接触

在 ABAQUS 中定义两个结构之间的接触的第一步是创建面。接着成对地创建可能相互接触的面之间的相互作用。每一个相互作用调用一个接触属性。接触间的压力－间隙关系及摩擦的性质都是接触属性的一部分。

■ 定义接触面

接触面通过可能成为接触面的单元面来生成。假设在 ABAQUS/CAE 中已经定义了单元面。

● 在实体单元上的接触面

对于二维和三维实体单元，可以指定部件的区域形成接触面或由 ABAQUS 自动确定部件的自由面。对于前者可选择部件副本的面形成接触面，对于后者在定义接触面时只需简单地选择整个部件副本，ABAQUS 将略去实体内单元，只保留与表面有关的单元。

● 在壳、膜和刚性单元上的接触面

对于壳、膜和刚性单元，必须指明单元的哪个面来形成接触面。单元正法向方向的面称为 SPOS 面，而单元负法向方向的面则称为 SNEG 面，具体如图 13-3 所示。单元的连接次序就定义了单元正法向。单元正法向可以在 ABAQUS/CAE 中观察到。

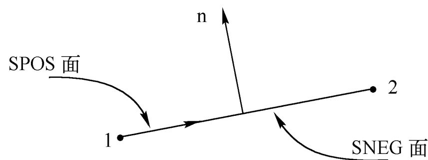


图 13-3　在二维壳或刚性单元上创建接触面

在 ABAQUS 用户手册的相关章节中讨论了在 ABAQUS 中生成面的限制。在开始接触分析之前请阅读这部分内容。

■ 刚性接触面

刚性接触面是刚性体的表面。刚性接触面可以定义为一个解析面或者基于刚性体的单元表面定义。

解析刚性接触面有两种基本形式。在二维模型中给出的解析刚性接触面是一个二维的分段刚性面。接触面的横截面轮廓线可在二维平面上用直线、圆弧和曲线定义。三维的刚性接触面的横截面可用相同的方式在用户指定的平面上定义。这样这个横截面可以绕一个轴扫掠成回旋面或沿一个矢量拖拉成三维的面，如图 13-4 所示。

解析型的刚性接触面的优点在于只用少量的几个点便可定义，并且计算效率高。然而在三维情况下，创建的形状受到限制。

离散形式的刚性面是基于构成刚性体的单元的，这样它可以创建比解析刚性面更为复杂的刚性接触面。离散的刚性面创建的方法与可变形体的面的创建方法相同。

在涉及刚性接触面的接触问题建模时，有一些问题需要考虑，请参阅 ABAQUS 用户手

册的相关章节。下面将一些较为重要的问题在此叙述。

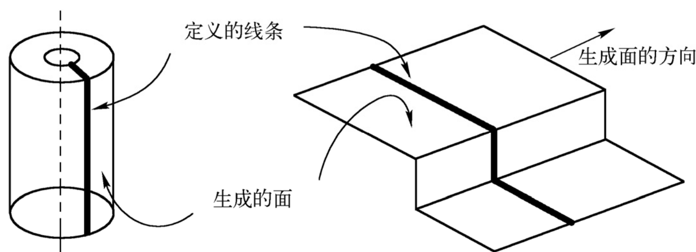


图 13-4　解析型的刚性接触面

在接触相互作用中，刚性接触面永远是主面。

刚性接触面要足够大以保证从属结点不滑出该面和落到其背面。如果这种情况发生，解通常不能收敛。应延展刚性面或沿其周边弯折边角（见图 13-5）避免从属结点落到主面的背面。

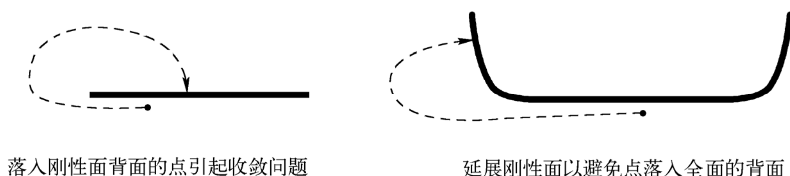


图 13-5　延展刚性面预防收敛问题

变形体的网格要剖分得足够精细，以便于与刚性面上的特征相互作用。如果与刚性面相接触的单元的尺寸为 20mm，而刚性面上有 10mm 宽的特征，则没有点来描述这个特征，刚性接触面的形状将侵入可变形的接触面，如图 13-6 所示。

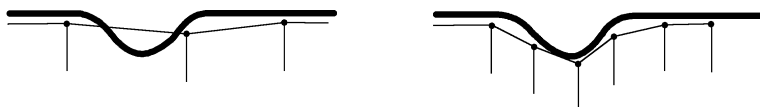


图 13-6　刚性接触面侵入可变形的接触面

当可变形的接触面网格剖分得足够细时，ABAQUS 将阻止刚性面对从面的侵入。

ABAQUS/Standard 的算法要求接触相互作用的主面光滑。刚性接触面永远是主面，所以要求其光滑。ABAQUS 并不要求离散的刚性接触面光滑，但提高离散的刚性接触面细化水平可以控制光滑度。解析的刚性接触面上有突变的角要用倒圆角，使其光滑。如图 13-7 所示。

刚性接触面的法向永远指向与之接触的从面。如果这一要求没有满足，ABAQUS 将认为可变形的从面上的所有点都为过约束；分析因收敛困难而中断。

解析刚性接触面的法向定义为：按构成刚性面的每条线段和弧线的起点至终点的矢量方向逆时针旋转 90°来确定，参见图 13-8 所示。

由于离散的刚性接触面由刚性单元所生成，所以其法线在生成刚性单元时就已经定义了。



图 13-7　光滑解析刚性接触面

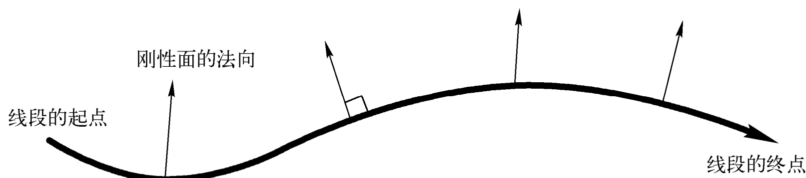


图 13-8　解析刚性接触面的法向

■ 接触相互作用

在 ABAQUS 模拟分析中，通过给接触相互作用赋于面的名字来定义两个面之间可能的接触。在定义接触相互作用时，必须指定相对滑动量是小量还是有限量。

默认设置是较为普遍的有限滑动公式。如果两个表面相对滑动的量比单元面特征尺度小得多时，使用小滑动公式使计算的效率更高。

每个接触相互作用必须调用接触属性，这与每个单元必须调用单元属性的方式类似。接触属性包括摩擦这类的本构关系。

■ 从面和主面

ABAQUS 使用单纯的主-从接触算法：从面上的结点不能侵入主面的任何部分；而该算法对主面没有作限制；主面可以在从面的结点之间侵入从面，如图 13-9 所示。

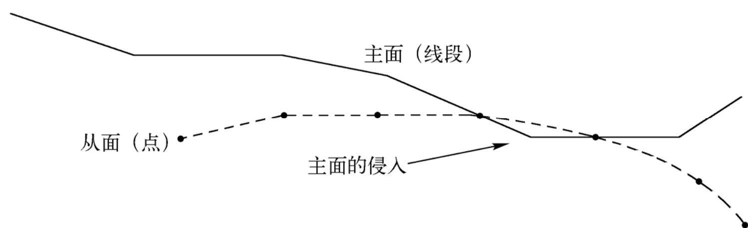


图 13-9　主面可以侵入从面

因为存在严格的主-从关系，所以必须小心地选择主、从接触面以获得最佳的接触分析结果。一些简单的规则如下：

◆ 从面应该是网格划分得更精细的面；

◆ 如果主、从面的网格密度相近，从面应定义在较软的材料部件上。

■ 小滑动与有限滑动

当使用小滑动公式时，ABAQUS 在分析开始时就建立从属点和主面之间的关系。一旦 ABAQUS 确定主面的哪个部分将与从面的结点发生作用，在整个分析过程中这些关系维持不变，决不改变主面的那个部分与从属接触表面的结点的作用关系。

如果模型中有几何非线性，小滑动算法要考虑主面的转动和变形及由此改变的载荷路径，随着载荷路径改变而改变接触力。如果在模型中没有几何非线性，则忽略主面的转动和变形，载荷的路径维持不变。

有限滑动接触公式要求 ABAQUS 频繁判断主面上的区域与从面的每个结点的接触状态。这个计算很复杂，尤其是两个接触体都在变形时。在这种模拟过程中的结构可以是二维的也可以是三维的。

当结构折叠靠向自身时就发生了自接触，在变形体自接触问题中，ABAQUS 也可使用有限滑移公式。但这个功能仅对二维问题（平面应力、平面应变及轴对称）有效。

有限滑动公式对刚—柔接触的计算没有柔—柔接触的计算那么复杂。在主面是刚性的情况下，有限滑动分析可应用在二维和三维的模型中。

■ 单元选择

为接触分析选择单元时，一般来说，在将会形成从面的模型部分最好用一阶单元。

二阶单元在接触分析中有时可能会出现问题，原因在于二阶单元对均布的压力计算结点等效载荷的方式上。例如 A 面上一个二维的二阶单元对均布压力 p 的结点等效载荷，如图 13-10 所示。

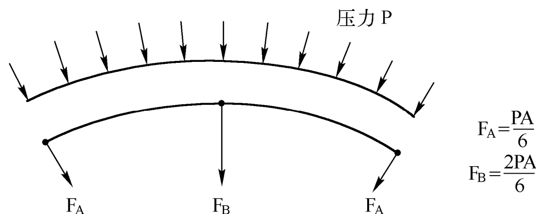


图 13-10　作用在二维的二阶单元上的均布压力的等效结点载荷

接触算法的关键是确定作用在从面结点上的力；而这种算法很难从图 13-10 所示的分布中区分究竟是均布接触压力还是单元的实际分布力。

对于三维二阶块体单元的等效结点力更会引起混淆，因为在均布压力作用下，这些结点力甚至连符号都不相同，这使得接触算法遇到很大的困难，尤其对于非均匀的接触更是如此。

因此，为了避免这类问题，ABAQUS 自动地在二阶三维实体或楔型体单元中的面上加一个中面结点，来标识从面。

对于均布压力，虽然带有中面结点的二阶单元的各等效结点力量值有相当大差异，但每个结点力与均布压力有相同的正负号。

对于作用的压力，一阶单元的各等效结点力总是与其正负号和量值一致。因此，由结点力所表示的给定力的分布与接触状态之间没有歧义性。

如果几何形状复杂并需要用自动剖分形成网格时，在 ABAQUS 中应该用修正的二阶四面体单元（C3D10M），C3D10M 单元专门用于复杂接触的分析。

标准的二阶四面体（C3D10）的角结点接触力为零，这样将导致接触压力的预测值很差。因此 C3D10 单元不应该在接触问题中使用。而修正的四面体单元（C3D10M）可以计算出精确的接触压力。

13.1.3 接触算法

理解 ABAQUS 的接触算法有助于理解和诊断输出文件中的信息和成功地进行接触分析。

图 13-11 所示为 ABAQUS/Standard 中用的接触算法流程图。该算法建立在 ABAQUS 非线性分析中所讨论过的 Newton-Raphson 技术的基础之上。

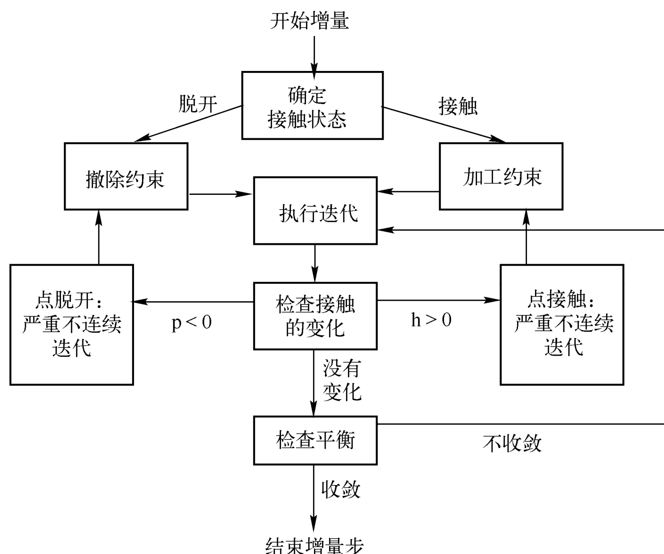


图 13-11　接触分析逻辑流程图

ABAQUS 在每个增量步开始之前检查所有接触相互作用状态，以判断从属结点是脱开还是闭合。在图 13-11 中 p 表示从属结点上的接触压力，h 表示从属结点对主面的侵入距离。

如果一个结点是闭合的，ABAQUS 确定它是在滑动还是粘结。ABAQUS 对每个闭合结点加以约束，而对那些接触状态从闭合到脱离变化的结点撤除约束。然后 ABAQUS 再次进行迭代并用计算修正值来改变模型。

在检验力或力矩的平衡前，ABAQUS 先检查从属结点上接触状态的变化。若结点在迭代后间隙变为负值或零，则它的状态由脱离变为闭合。

若结点在迭代后接触压力变为负值，则它的状态则由闭合变为脱开。如果检测到当前迭代步的接触状态有变化，ABAQUS 将它标识为严重不连续迭代（severe discontinuity iteration)，且不进行平衡检验。

在第一次迭代结束后，ABAQUS 通过改变接触约束来反映接触状态的改变，然后进行第二次迭代。ABAQUS 重复这个过程，直到接触状态不再变化才结束迭代。

接着的迭代为第一次平衡迭代，并且 ABAQUS 进行正常的平衡收敛检查。如果收敛检查失败，ABAQUS 将进行下一次迭代。

每当一个严重不连续迭代发生时，ABAQUS 将内部平衡迭代计数器重新置零。这个平衡迭代的计数用于确定是否因收敛慢而放弃这个增量步。ABAQUS 重复整个过程直至获得

收敛的结果，如图 13-11 所示。

在信息和状态文件中，每完成一个增量步就会总结显示有多少次严重不连续迭代和多少次平衡迭代。增量步的总迭代数是这两者之和。

通过区分这两类迭代，可以看到 ABAQUS 非常适合处理接触计算和很恰当地完成平衡迭代。当严重不连续迭代数很多，而只有很少的平衡迭代时，ABAQUS 对确定合适的接触状态就会出现困难。

在默认情况下，ABAQUS 会放弃那些超过 12 个严重不连续迭代的增量步，而改用更小的增量步。如果没有严重不连续迭代，接触状态从一个增量步到另一个增量步之间没有改变。

13.1.4 接触工程分析的关键技术

接触工程是常见的工程分析，ABAQUS 具有非常强的接触分析处理能力，但在进行接触分析时以下关键技术需要掌握。

首先，论述接触面间距离的定义。定义接触面之间的距离一般有如下三种方法，下面分别介绍。

■ 根据几何模型的装配尺寸定义

这种方法要求在用 CAD 软件（例如：PRO/E）或者分析软件（例如：ABAQUS）建立几何模型时考虑各个部件之间的装配关系，即各个部件之间装配的相对位置要精确，ABAQUS 软件根据装配部件之间的相对位置来判断接触面（主面和从面）的距离，从而确定各个部件之间的接触状态。

如果几何模型是通过 CAD 软件建立的，之后再导入到 ABAQUS 软件中处理，各个部件之间很有可能存在装配误差，所以一般都会在定义接触面对时，给参数 ADJUST 设置一个位置误差限度，用来调整从面结点的初始坐标。

基本格式如下：

```
*CONTACT PAIR,INTERACTION=<接触属性的名称>,ADJUST=<位置误差限度><从面名称>,<主面名称>
```

具体操作步骤为：在 ABAQUS/CAE 中打开“相互作用”模块，单击主菜单的“相互作用→创建”命令，在“编辑相互作用”（Edit Interaction）对话框的“从结点/表面调整”选项卡区域选中“为调整区域指定容差”，在其后输入位置误差限度的值。

■ 使用关键字*CONTACT INTERFERENCE 定义

这种方法对于求解较大的初始过盈接触问题很适用，使用关键字*CONTACT PAIR INTERACTION 定义接触面之间的距离或过盈量，类似于在两个部件之间施加载荷，该关键字不能在初始分析步中定义，只能在后续分析步中定义。

基本格式如下：

```
*CONTACT PAIR,AMPLITUDE=<幅值曲线的名称>,<从面名称>,<主面名称>,<过盈量或间隙量>
```

具体操作步骤为：在 ABAQUS/CAE 中打开“相互作用”模块，单击主菜单的“相互作用→创建”命令，单击（非初始步外的分析步）“编辑相互作用”对话框底部“选项”区域的“干涉调整”。

如果几何装配模型中各个部件之间存在装配误差，也要通过定义接触面时的参数ADJUST来调整各个部件之间的装配间隙，否则关键字*CONTAC TINTERFERENCE中的参数<过盈量或间隙量>不会起作用，基本格式中的参数<过盈量或间隙量>为负值表示过盈接触，正值表示两个面之间是缝隙接触。

■ 使用关键字*CLEARANCE定义

使用关键字*CLEARANCE可以定义两个接触面之间的初始过盈量或间隙量，但是它只能应用于小滑移，并且不需要使用参数ADJUST调整从面结点的位置。

在ABAQUS软件中，分析模型各个部件的接触表面可以在基于单元的实体上定义，也可以在基于几何实体上定义，接触面的类型可以是基于单元、结点、解析刚性面和多个表面的，可以根据分析模型的具体情况具体设定，下面主要讲解一下刚性接触面的定义。

刚性表面是刚性体的表面。可以是基于已经建立的刚性解析表面部件的，也可以是基于离散刚性表面部件的，还可以是基于在“相互作用”模块中通过执行“约束→创建”命令约束成“刚体”命令确定的刚性表面。

下面讲解几何模型和分析模型的区别。

几何模型可以是其他CAD软件建立的CAD模型，也可以是分析软件自己建立的几何分析模型，只包括几何特征要素（包括点、线及面等）没有任何其他的约束条件（例如，边界条件的设定、载荷的施加以及结果数据的输出设定等）可以但不限于包括几何模型各个零部件之间的几何装配约束。

分析模型是包括几何模型在内的，并通过分析软件整个前处理过程建立起来的最终要递交求解的模型，既包括几何模型的特征要素，也包括分析软件施加的各种约束条件。

在求解接触问题时经常会碰到通用接触算法，下面就简单介绍通用接触的特点及具体的实现方式。

■ 通用接触的特点及其适用范围

通用接触分析多用于具有复杂拓扑关系的接触分析模型中。

该算法非常容易使用，软件自动分析模型并建立模型实体间的接触关系，从而节省分析人员的时间成本。

通用接触算法一般比双面接触算法的执行更快。

■ 通用接触分析中的接触定义丰富

对于接触分析模型，可以定义全局或者局部摩擦系数。

用户通过自定义可以控制接触厚度（尤其是壳）；可以以接触对的方式指定接触域（而不是ALL ELEMENT BASED）；可以设置特征边界条件；也可以为指定的接触区域单独分配接触属性，基本格式如下：

```
*CONTACT
*CONTACT INCLUSIONS,ALL ELEMENT BASED
*CONTACT PROPERTY ASSIGNMENT,,prop_1（以全局的方式重新指定属性）Surf_1,surf_2,
prop_2（局部修改）
Surf_3,surf_4,prop_3（局部修改）
```

■ 最常用、最简单的通用接触算法定义，即整个模型的“自动接触”的基本格式如下：

```
*CONTACT
*CONTACT INCLUSIONS, ALL ELEMENT BASED
```

■ 通用接触算法的主选项和子选项

（1）主选项

```
*CONTACT
```

（2）子选项

1）常用的选项：

```
*CONTACT INCLUSIONS
*CONTACT PROPERTY ASSIGNMENT
```

2）不常用的选项：

```
*SURFACE PROPERTY ASSIGNMENT
*CONTACT EXCLUSIONS
```

3）很少用的选项：

```
*CONTACT FORMULATION
*CONTACT CONTROLS ASSIGNMENT
```

13.2 接触问题实例

在 ABAQUS 动力学分析中曾进行了一个简单的接触的定义——刚体与可变形体的接触，其接触面为光滑无摩擦的。本章所介绍的示例将会涉及更多的接触作用的参数设置，更为复杂也更为接近实际工程。但无论有多复杂，都是以最简单的相互作用为基础的，操作方式也是类似的。

13.2.1 接触问题基础实例——法兰的密封尺寸

如图 13-12 所示为法兰盘接头的几何尺寸。上部法兰盘的材料为钢，下部法兰盘的材料为铝。接头承受了 200kN 的轴向载荷。密封圈用于接头的密封。在初步设计中，将密封圈放置在距法兰盘内边 0.01m 处。

要求确定法兰盘在密封位置分开的距离，以便选择合适的密封尺寸。类似地，也用计算模型来确定合适的法兰盘整体尺寸。

（1）启动 ABAQUS/CAE，创建一个模型数据库，进入“部件”模块。如采用命令操作，则一开始就要定义好 ABAQUS 的信息打印状态，如下所示。

```
*Heading
** Job name: Pull Model name: Flang
** Generated by: Abaqus/CAE 6.12-1
**DAT 文件打印请求
*Preprint, echo=YES, model=NO, history=YES, contact=NO
**
```

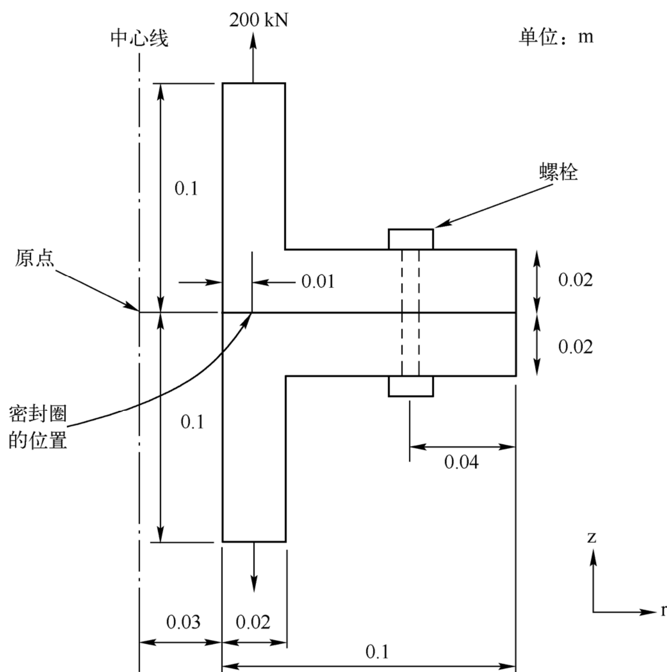


图 13-12　模型几何尺寸

（2）单击按钮，在弹出的“创建部件”对话框中按图 13-13 进行设置，选择“二维平面”，单击“继续”，在草图中绘制如图 13-14 所示的草图。



图 13-13 “创建部件”对话框

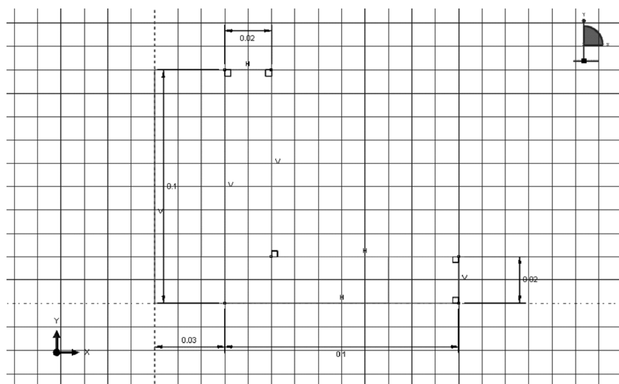


图 13-14　草图

单击中键完成，生成如图 13-15 所示的壳。

（3）单击按钮，在弹出的“创建部件”对话框中按图 13-16 进行设置，选择“二维平面”，单击“继续”，在草图中绘制如图 13-17 所示的草图。

单击中键完成，生成如图 13-18 所示的壳。

（4）熟练的用户可以在 INP 文件中直接采用命令创建这种简单的图形。

```
** PARTS
**
**部件名称 BOT，开始定义结点
*Part, name=BOT
*Node
1, 0.0299999993, -0.100000001
```

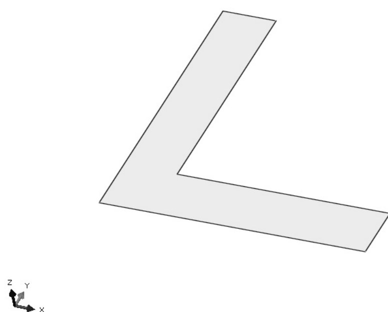


图 13-15　TOP 部件



图 13-16 “创建部件”对话框

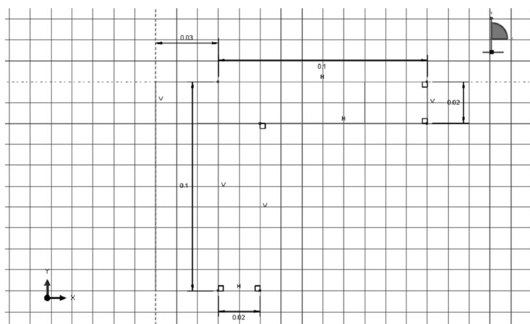


图 13-17　草图

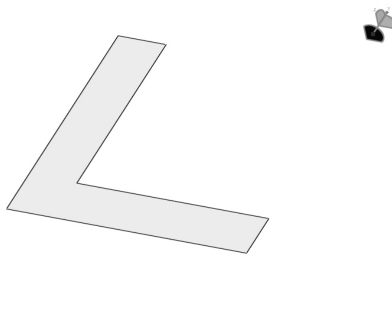


图 13-18　BOT 部件

采用这种格式直接输入所有坐标即可。然后再将这些结点连接成单元，采用如下格式。

```
**选择线性轴对称非协调单元，定义 BOT 部件的单元
*Element, type=CAX4I
 1, 16, 45, 32,2
***
```

定义好单元号与相应结点号。然后使用如下命令填充内部单元。

```
*Nset, nset=Set-1, generate
1,57,1
```

```
*Elset, elset=Set-1, generate
1,36,1
```

（5）类似地，TOP 部件的结点定义如下。



```
**开始定义 TOP 部件的结点
*Part, name=TOP
*Node
1,0.129999995,0.
2, 0.0299999993,0.
3,0.129999995, 0.0199999996
**选择线性轴对称非协调单元，定义 TOP 部件的单元
*Element, type=CAX4I
 1, 47, 44, 13, 12
 2, 46, 43,9,8
*Nset, nset=Set-1, generate
1,57,1
*Elset, elset=Set-1, generate
1,36,1
```

（6）进入“属性”模块。由于两个法兰的材料不同，需要定义两个属性，每个法兰用不同的线弹性材料属性。上部法兰材料为钢（$E=200\times10^9$Pa，$\nu=3$，按图 13-19 进行设置），下部法兰材料为铝（$E=70\times10^9$Pa，$\nu=0.2$，按图 13-20 进行设置），创建材料并分别命名为 Steel 和 Aluminum。

这种材料使用命令定义十分简单，直接输入命令与相应的参数就可以完成。

```
**铝材料，用于 BOT 部件
*Material, name=Aluminum
*Elastic
 7e+10, 0.2
**钢材料，用于 TOP 部件
*Material, name=Steel
*Elastic
 2e+11, 0.3
**
```

（7）接下来创建两个均匀的实体截面定义：一个命名为 TOPSec，用钢的材料性质；另一个命名为 BOTSec，用铝的材料性质。将对应的截面定义赋给每个部件。

```
** Section: BOTSec
*Solid Section, elset=Set-1, material=Aluminum
,
** Section: TOPSec
*Solid Section, elset=Set-1, material=Steel
,
```

（8）采用以上命令在“部件”模块中也可以定义，先声明后定义相应的材料与截面。

此时模型树如图 13-21 所示



图 13-19　Steel 材料定义

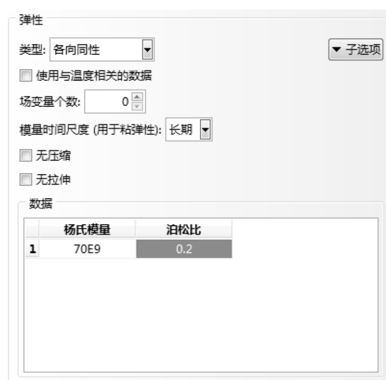


图 13-20　Aluminum 材料定义

（9）进入“装配”，单击，弹出“创建实例”对话框按图 13-22 进行设置，将两个部件实例化如图 13-23 所示。



图 13-21　定义完成属性的模型树



图 13-22　“创建实例”对话框

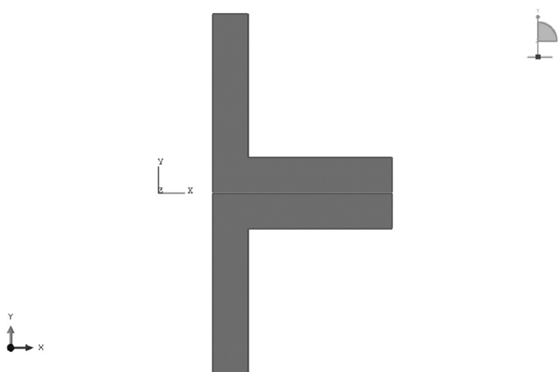


图 13-23　部件实例化

使用命令也可以将部件直接实例化，默认位置即可。

```
** ASSEMBLY
```



```
**
*Assembly, name=Assembly
**
**将两个部件实例化
*Instance, name=BOT-1, part=BOT
*End Instance
**
*Instance, name=TOP-1, part=TOP
*End Instance
**
```

（10）进入“分析步”模块，定义一个静态常规分析步，命名为“Pull”。在这个分析步的描述项输入“Apply axial loads to flanges”。

由于法兰盘的位移和应变很小，在模型中不考虑几何非线性。通常在接触分析时第一个增量步的大小为这个分析步总时间的 10%。而在这个分析中 ABAQUS 只需几个迭代就可以确定正确的接触状态。

```
** STEP: Pull
**
*Step, name=Pull
Apply axial loads to flanges
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
**
```

对于这个分析用 100%的载荷来做是非常容易的，没有必要用 10%的载荷，这样在初始的增量步使用 1.0 可以减少计算开销。对输出文件（.odb）可用默认值，这样可以在“可视化”模块中绘制应力和接触压力的等值线。

另外要输出分析开始时刻和每一个严重不连续迭代时刻的从面上点的接触状态。这个信息被写入到了信息文件（.msg）；该信息对检查计算开始时定义的接触面状态正确与否和确定分析过程中出现的问题特别重要。

（11）进入“相互作用”模块。首先定义法兰的接触面。在法兰间可能接触的相应区域对每个部件的副本需要分别定义接触面。

由于部件的接触区域重合，在定义一个部件上的接触面时，需要先设置隐藏另一个部件的显示。

在模型树中选择实例中的 BOT 如图 13-24 所示，单击右键，在菜单中选择将其隐藏，得到如图 13-25 所示的上半部分。

（12）在主菜单条上选择“工具（Tools）→表面（Surface）→创建（Create）”打开“创建表面”对话框如图 13-26 所示。

将面命名为“SurfTOP”，接受默认选项。选择上部法兰的底部区域作为接触面，单击中键。

隐藏上部法兰的显示，恢复下部法兰的显示。同上述过程一样定义下部法兰的顶面为接触面，并命名为“SurfBOT”，在“表面管理器”对话框中可以看到创建的两个表面，如

图 13-27 所示。

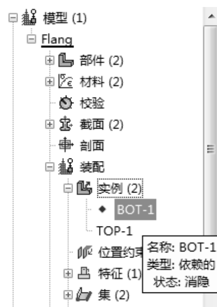


图 13-24　隐藏 BOT 部件

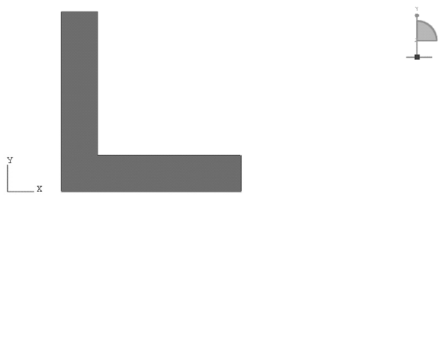


图 13-25　隐藏下半部分



图 13-26 “创建表面”对话框



图 13-27 “表面管理器”对话框

相比而言，这种定义在命令中更为直接。

```
*Nset, nset=TopBolt, instance=TOP-1
 4,
*Nset, nset=BotBolt, instance=BOT-1
 5,
*Nset, nset=Set-3, instance=TOP-1
 5,
*Elset, elset=_SurfTOP_S3, internal, instance=TOP-1
1,2,8, 11, 34
*Elset, elset=_SurfTOP_S1, internal, instance=TOP-1
6,9, 12, 27, 33
*Surface, type=ELEMENT, name=SurfTOP
_SurfTOP_S3, S3
_SurfTOP_S1, S1
```

在完成接触面的定义后，恢复所有部件的显示。

（13）单击按钮，弹出图 13-28 所示的“创建相互作用属性”对话框，创建一个“接触”相互作用属性。

单击“继续”，弹出图 13-29 所示的“编辑接触属性”对话框，选择“力学”下的“切向行为”，定义“摩擦公式”为“罚”，“摩擦系数”为“0.1”，单击“确定”完成。



图 13-28 “创建相互作用属性”对话框



图 13-29 “编辑接触属性”

或者采用命令方式进行定义。

```
**定义接触属性
** INTERACTION PROPERTIES
**
**定义摩擦函数与系数
*Surface Interaction, name=Contact
1.,
*Friction, slip tolerance=0.005
 0.1,
**
```

（14）单击按钮，弹出图 13-30 所示的“创建相互作用”对话框，输入相互作用名称，选择“表面与表面接触（Standard)”，单击“继续”。

（15）弹出图 13-31 所示的“编辑相互作用”对话框，选择上一步创建的 SurfTOP 为主表面，SurfBOT 为从表面，单击中键。按图进行设置。

鼠标单击选择通常不如命令直接定义更为准确。

```
**创建接触面的主面
*Elset, elset=_SurfBOT_S3, internal, instance=BOT-1
1, 24
*Elset, elset=_SurfBOT_S4, internal, instance=BOT-1
3, 27
*Elset, elset=_SurfBOT_S1, internal, instance=BOT-1
 20, 25, 26, 29, 30
*Elset, elset=_SurfBOT_S2, internal, instance=BOT-1
 21,
**创建接触面的从面
*Surface, type=ELEMENT, name=SurfBOT
_SurfBOT_S3, S3
```



图 13-30 “创建相互作用”对话框



图 13-31 “编辑相互作用”对话框

```
_SurfBOT_S4, S4
_SurfBOT_S2, S2
_SurfBOT_S1, S1
*Elset, elset=_Surf-3_S1, internal, instance=BOT-1
 6,
*Elset, elset=_Surf-3_S1, internal, instance=TOP-1
19,
*Elset, elset=_Surf-3_S4, internal, instance=BOT-1
 15,
*Elset, elset=_Surf-3_S4, internal, instance=TOP-1
 26,
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-3
_Surf-3_S1, S1
_Surf-3_S4, S4
*Contact Pair, interaction=Contact, type=SURFACE TO SURFACE
SurfBOT, SurfTOP
```

选择上一步创建的相互作用属性，单击“确定”完成。

（16）连接法兰螺栓的影响需要考虑，最简单的方法是在上部法兰的螺栓中心线处布置一个点，与下部法兰对应点用约束方程联系起来。

另外一个方法是用 TIE MPC 将对应的点约束起来。该方法请参阅 ABAQUS 用户手册的相关章节。

定义约束方程有两步：为了在螺栓的中心线部位引入点，首先需要对两个法兰进行分

区；然后将这些位置定义为几何集。在布置新的点时必须非常小心。例如不能在两个相接触的面上设置点。为了避免模型的过约束，约束不可布置在从面上。

（17）回到“部件”模块，使用按钮将图 13-32 与图 13-33 所示的线在中点位置拆分。

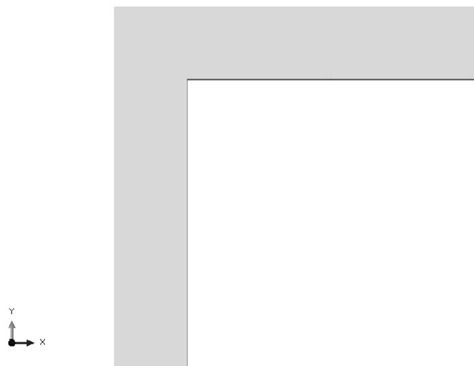


图 13-32 BOT 部件的拆分对象

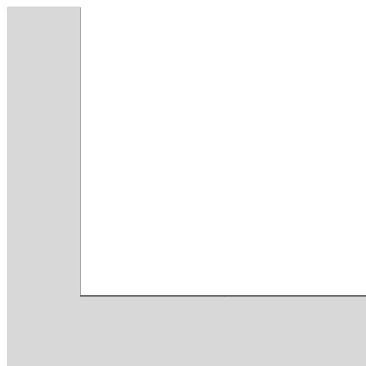


图 13-33 TOP 部件的拆分对象

（18）接着将各法兰上的点分别定义成几何集，命名为“TopBolt”和“BotBolt”，如图 13-34 所示。这些几何集将用于约束方程的定义。



图 13-34 “设置管理器”对话框

该模型需要两个线性约束方程：在螺栓中心线上沿法兰的径向和轴向的位移（轴对称模型的自由度为 1 和 2）各需一个。TopBolt 和 BotBolt 集的径向约束用来保证自由度 1 的位移相同，而轴向约束保证两个集在自由度 2 方向位移相同，方程如下：

$$\begin{cases} u_1^{top} - u_1^{bot} = 0 \\ u_2^{top} - u_2^{bot} = 0 \end{cases} \tag{13-1}$$

（19）单击按钮，弹出图 13-35 所示的“创建约束”对话框，选择“方程”，单击“继续”。弹出“编辑约束”对话框，定义约束方程如图 13-36 所示。

单击“确定”，完成方向 1 的约束。

（20）单击按钮，弹出图 13-37 所示的“创建约束”对话框，选择“方程”，单击“继续”。弹出“编辑约束”对话框，定义约束方程如图 13-38 所示。

单击“确定”，完成方向 2 的约束。

在命令中定义约束方程比直接操作简单得多。



图 13-35 “创建约束”对话框



图 13-36 “编辑约束”对话框



图 13-37 “创建约束”对话框



图 13-38 “编辑约束”对话框

```
**定义约束方程
** Constraint: Constraint-U1
*Equation
2
TopBolt, 1, 1.
BotBolt, 1, -1.
** Constraint: Constraint-U2
*Equation
2
TopBolt, 2, 1.
BotBolt, 2, -1.
```

此外，用三维网格可得到更真实的法兰盘模型。利用模型的轴对称性，可以只用法兰的部分来建模。螺栓加载选项同样可以利用对称性。

（21）进入“载荷”模块。

在每个法兰的端部施加 200kN 的轴向载荷。在该模型中用分布载荷。分布压力的大

小为：

$$p=\left(\frac{200000}{\pi(0.05^2-0.03^2)}\right)Pa\approx 39.8MPa \tag{13-2}$$

单击按钮，弹出图 13-39 所示的“创建载荷”对话框，输入载荷的名称，选择“Pull”分析步，定义“类别”为“力学”、“可用于所选分析步的类型”为“压强”，单击“继续”，在视图中拾取图 13-40 所示的两端。



图 13-39 “创建载荷”对话框

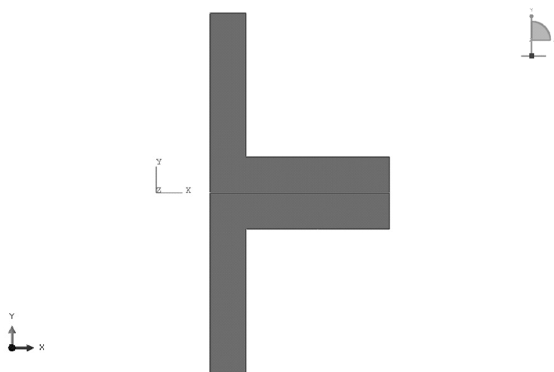


图 13-40 施加载荷的位置

单击中键，弹出图 13-41 所示的“编辑载荷”对话框，输入大小为“-39.8E6”，单击“确定”完成载荷的添加，如图 13-42 所示。

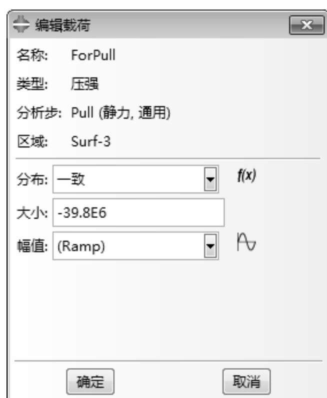


图 13-41 “编辑载荷”对话框

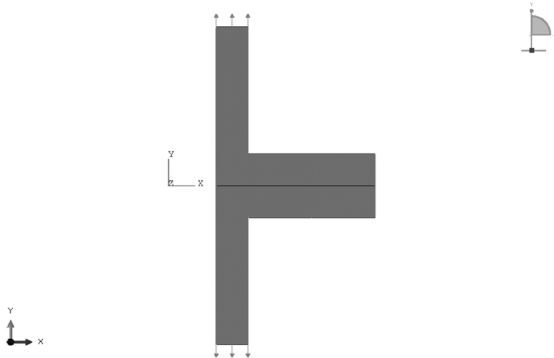


图 13-42 加载

可以输入如下命令进行定义。

```
**
** LOADS
**
** Name: ForPullType: Pressure
*Dsload
```

```
Surf-3, P, -3.98e+07
**
```

（22）此时，读者会有疑问：在这个分析过程中似乎不需要边界条件。施加在每个法兰上的力大小相等方向相反，因而载荷能自平衡。然而在没有约束条件情况下，计算机的精度误差在模型上会产生很小的不平衡力，在该例中，如果该模型分析过程中没有边界条件，微小的不平衡力足以引起模型产生无限的刚体运动。

这样的刚体运动在数学上称为数值奇异性。在分析过程中当 ABAQUS 检测到数值奇异性时，它会在信息文件中输出求解问题信息。这类信息格式如下：

```
***WARNING: SOLVER PROBLEM. NUMERICAL SINGULARITY WHEN PROCESSING NODE
57INSTANCE TOPFLANGE-1D.O.F. 2 RATIO = 1.14541E+14
```

在信息中输出的结点号，说明包含该结点那部分网格没有被约束。自由度给出了刚体运动发生的方向。

一般而言有数值奇异性的分析结果是不可接受的。为了在一个静态分析过程中避免数值奇异性，必须施加足够的约束条件以避免模型中各部件的刚体运动。

刚体运动包括部件的平动和转动。刚体运动与模型的维数关系如表 13-1 所示。

表 13-1　刚体运动与维度的关系

维数	可能的刚体运动
三维	在 1, 2,和 3 方向的平移
	绕 1, 2, 和 3 方向的旋转
轴对称	在 2 方向的平移
	绕 3 方向的旋转(仅对轴对称刚性体)
平面应力	在 1 和 2 方向的平移
平面应变	绕 3 方向的旋转

本例需要对法兰的轴向（z 方向或整体坐标轴 2 方向）约束以避免分析过程中出现刚体运动。由于法兰被拴在一起，只需对模型上一个点施加轴向约束。在该分析过程中施加载荷所引起约束点的反力近似为零，因此可在模型中任何点上施加约束。

因为约束反力非常小，约束的位置不是十分重要。施加约束的规则如下：

- 边界条件不应施加在从面上，它会与接触约束发生冲突；
- 边界条件不应施加在有线性约束方程的自由度上，如果在有约束方程的自由度上施加边界条件，ABAQUS 将在数据文件中给出错误消息；
- 为了容易检查约束处的反力，边界条件不应施加在载荷作用处。

（23）在上半法兰拐角位置创建一个名为“Fix“的几何集，固定这个位置的 2 方向，边界条件命名为“Fix one point”。

在命令中定义如下。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**定义固定约束
** Name: Fix one point Type:  位移/转角
*Boundary
Set-3, 2, 2
```

（24）进入“网格”模块。

在生成网格之前应考虑单元的类型。在选择单元类型时，必须考虑诸如模型的几何形状、将要观看的变形类型及载荷施加等几个方面因素。下面为该分析过程中需考虑的重点。

- 法兰之间的接触，只要有可能就应该用一阶单元模拟接触问题（四面体单元除外）。在使用四面体单元时，应该使用修正的二阶四面体单元。
- 在载荷作用下，法兰的弯曲是非常明显的。而全积分一阶单元在弯曲变形时会产生剪切锁闭，因此应使用减缩积分单元或非协调单元。
- 网格应该用规则形状的单元，这是因为非协调元对单元扭曲很敏感。

基于这些考虑，模型中采用 CAX4I 单元。

单击按钮，为 TOP 部件与 BOT 部件布种，单元尺寸为 0.01，如图 13-43 与图 13-44 所示。

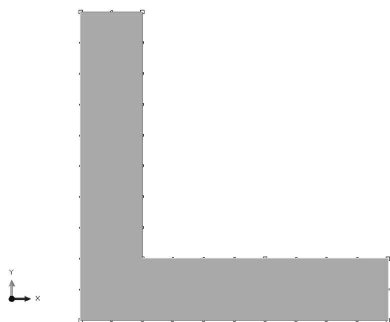


图 13-43 TOP 部件的种子

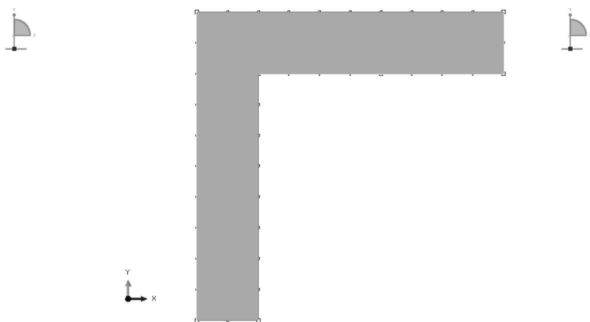


图 13-44 BOT 部件的种子

单击按钮，弹出图 13-45 所示的“网格控制属性”对话框，选择“四边形”单元形状，单击“确定”完成。再单击按钮，弹出图 13-46 所示的“单元类型”对话框，选择 CAX4I 单元（四结点双线性轴对称四边形单元，非协调模式）。



图 13-45 “网格控制属性”对话框

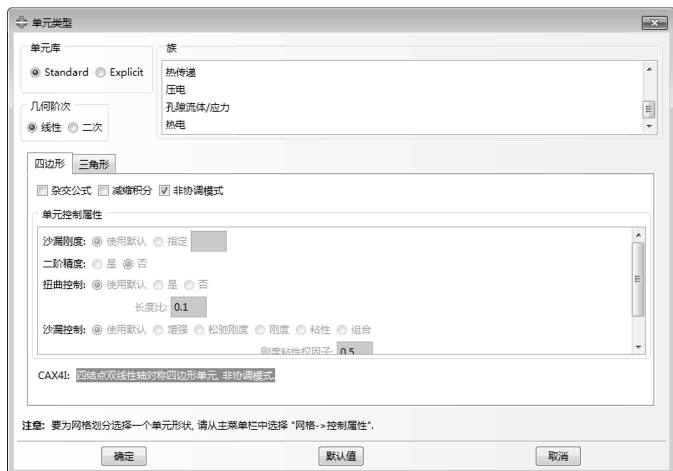
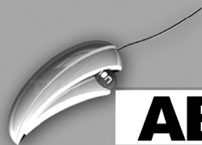


图 13-46 “单元类型”对话框

单击按钮，单击中键，完成网格划分，如图 13-47 所示。



（25）进入“作业”模块，单击按钮，弹出图 13-48 所示的“创建作业”对话框，定义一个新的作业，单击“继续”，弹出图 13-49 所示的“编辑作业”对话框，接受默认设置，单击“确定”，完成作业的定义。在分析步中可以定义如下的输出请求。

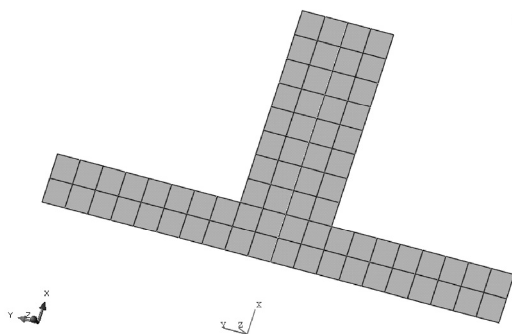


图 13-47　网格划分



图 13-48 “创建作业”对话框

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

本例提供 INP 文件，读者可以参考本例，自己动手练习编写 INP 文件。

（26）完成分析后，进入“可视化”模块，显示变形图如图 13-50 所示。

使用工具，可以显示法兰 Mises 应力云图如图 13-51 所示，位移云图如图 13-52 所示。

法兰 Mises 应变云图如图 13-53 Mises 应变云图所示，反作用力云图如图 13-54 所示。

法兰应变分量符号如图 13-55 所示，空间位移符号如图 13-56 所示。

法兰应力分量符号如图 13-57 所示，接触力云图如图 13-58 所示。

作业监控和状态文件的内容记录了分析过程的状态信息。当出现问题时，这些文件的内容可以在“作业监控器”（Job Monitor）和状态文件中显示出经过四个迭代步后分析完成。

```
“
SUMMARY OF JOB INFORMATION:
STEP INC ATT SEVERE EQUIL TOTAL TOTALSTEP INC OF DOF IF
DISCON ITERS ITERSTIME/ TIME/LPF TIME/LPF MONITOR RIKS
```

ITERSFREQ
1112241.00 1.00 1.000
”



图 13-49 “编辑作业”对话框

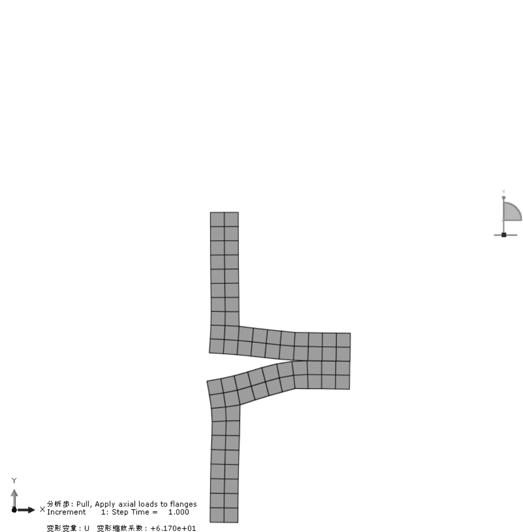


图 13-50 变形图（显示比例约为 61 倍）

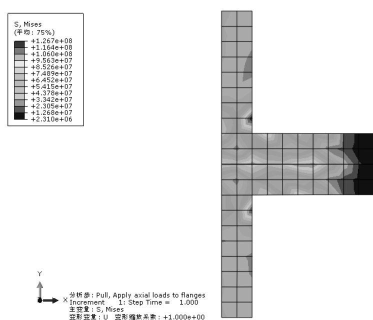


图 13-51 Mises 应力云图

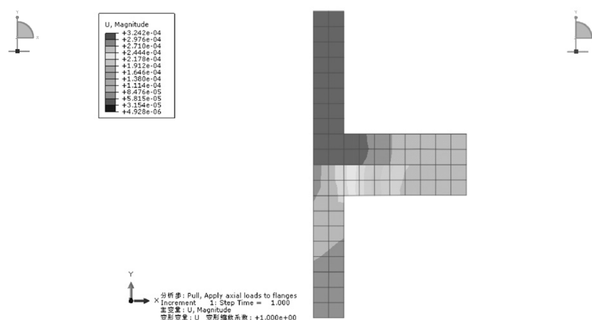


图 13-52 位移云图

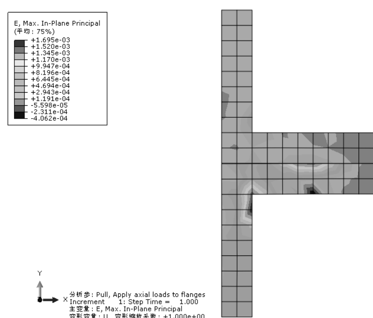


图 13-53 Mises 应变云图

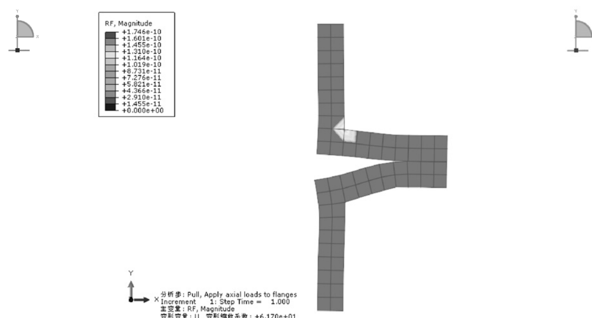


图 13-54 反作用力云图

ABAQUS 需要两个迭代步来建立模型的正确接触状态，也就是判断下部法兰盘的点有

没有与上部法兰盘接触。第三个迭代步中接触状态没有发生改变，所以 ABAQUS 检查力的平衡和判断出不满足平衡收敛条件。第四个迭代步得到收敛解。ABAQUS 之所以能在一个时间增量步中施加 100%的载荷而成功完成分析，主要原因是模型中只有法兰盘间的接触非线性。这样一旦 ABAQUS 确定了正确的接触状态，将很容易得到载荷施加在法兰盘上的解。

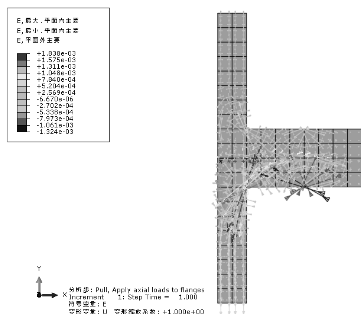


图 13-55 应变分量符号

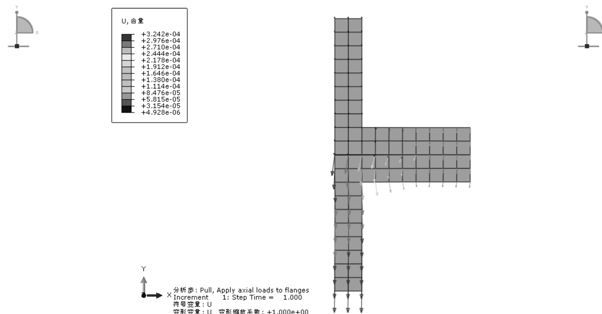


图 13-56 空间位移符号

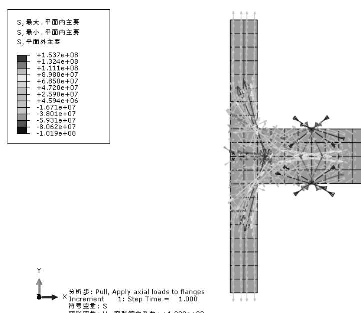


图 13-57 应力分量符号

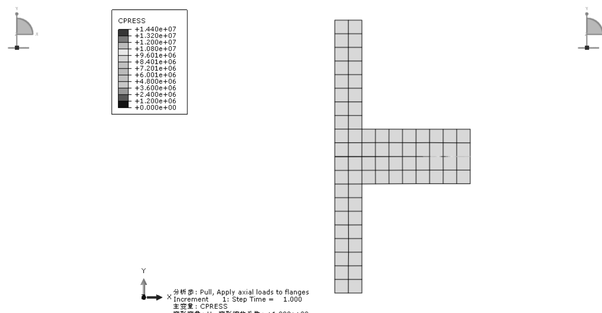


图 13-58 接触力云图

在接触分析过程中应该使用接触诊断的输出，因为它将在信息文件中提供模型接触状态改变的详细信息，将所有的接触相互作用的初始状态列在信息文件的前部。在这个分析中最开始时接触面贴合在一起。通常接触的面被告知有非常小的过闭合。

“

DETAILED OUTPUT OF CONTACT CHANGES DURING ITERATION REQUESTED

EQUATION ARE BEING REORDERED TO MINIMIZE WAVEFRONT

SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 6 INSTANCE

BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14

SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 24 INSTANCE

BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14

SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 1 INSTANCE

BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 23 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 22 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 21 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 19 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 5 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 17 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 18 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 20 INSTANCE
BOTFLANGE-1 INITIALLY OVERCLOSED BY 2.22000E-14
”

在严重不连续的迭代中，ABAQUS 将接触状态改变的从属结点号，以及它所属的接触相互作用输出到信息文件中。在该分析过程的第一个迭代中，六个从属结点的接触压力为负值，说明它们的接触状态由闭合变到脱开。

“

INCREMENT1 STARTS. ATTEMPT NUMBER1, TIME INCREMENT1.00
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 6 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -3.61156E+07
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 24 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -2.95528E+07
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 1 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -1.88339E+07
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 23 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -8.16618E+06
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 22 INSTANCE

BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -1.30793E+06
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 21 INSTANCE
BOTFLANGE-1 IS NOW STICKING
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 19 INSTANCE
BOTFLANGE-1 IS NOW STICKING
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 5 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -13600.
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 17 INSTANCE
BOTFLANGE-1 IS NOW STICKING
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 18 INSTANCE
BOTFLANGE-1 IS NOW STICKING
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 20 INSTANCE
BOTFLANGE-1 IS NOW STICKING

SEVERE DISCONTINUITY ITERATION1 ENDS
CONTACT CHANGE SUMMARY:0 CLOSURES6 OPENINGS.
”

ABAQUS 撤除这六个结点的接触约束，进行下一轮迭代。在下一轮迭代中又有两个结点脱离了与上部的法兰接触。

“
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 21 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -6.76556E+07
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 5 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OVERCLOSED BY 6.28695E-09
SLAVE SURFACE ASSEMBLY_BOTSURF MASTER SURFACE ASSEMBLY_TOPSURF NODE NUMBER 20 INSTANCE
BOTFLANGE-1 OPENS - CONTACT PRESSURE/FORCE IS -1.40881E+06

SEVERE DISCONTINUITY ITERATION2 ENDS
CONTACT CHANGE SUMMARY:1 CLOSURES2 OPENINGS.
”

在作必要的修改后，ABAQUS 又开始第三轮迭代，这一次检测没有发现接触状态的变化，因此执行常规的平衡收敛检查。残余力的检查满足容差，但位移校正值太大，超出增量步的最大位移值。ABAQUS 称这轮迭代为第一次平衡迭代。

“

EQUILIBRIUM ITERATION1

AVERAGE FORCE 2.247E+04TIME AVG. FORCE 2.247E+04
LARGEST RESIDUAL FORCE -808. AT NODE 19DOF1
INSTANCE: BOTFLANGE-1
LARGEST INCREMENT OF DISP. -3.236E-04AT NODE8DOF2
INSTANCE: BOTFLANGE-1
LARGEST CORRECTION TO DISP. -9.783E-05AT NODE6DOF2
INSTANCE: BOTFLANGE-1
FORCEEQUILIBRIUM NOT ACHIEVED WITHIN TOLERANCE.

”

第二次平衡迭代产生了第一个时间增量步的收敛解。

“

EQUILIBRIUM ITERATION2

AVERAGE FORCE 2.246E+04TIME AVG. FORCE 2.246E+04
LARGEST RESIDUAL FORCE -1.05 AT NODE 33DOF1
INSTANCE: TOPFLANGE-1
LARGEST INCREMENT OF DISP. -3.236E-04AT NODE8DOF2
INSTANCE: BOTFLANGE-1
LARGEST CORRECTION TO DISP. -2.754E-08AT NODE 19DOF1
INSTANCE: BOTFLANGE-1
THE FORCEEQUILIBRIUM EQUATIONS HAVE CONVERGED

ITERATION SUMMARY FOR THE INCREMENT:4 TOTAL ITERATIONS, OF WHICH
2 ARE SEVERE DISCONTINUITY ITERATIONS AND2 ARE EQUILIBRIUM ITERATIONS.

TIME INCREMENT COMPLETED1.00 ,FRACTION OF STEP COMPLETED1.00
STEP TIME COMPLETED1.00 ,TOTAL TIME COMPLETED1.00

”

由于两个法兰盘承受相同的载荷，所以它的应力状态是相似的。应力峰值约有 130MPa（见图 13-51）。这个应力值与材料的屈服应力比较，发现法兰盘没有屈服。该值也可以用于确定零件的疲劳寿命。

然而，这个分析选取的网格是非常粗糙的；忽略了几何形状的细部信息，例如倒角半径，而且对螺栓的效应也只用近似的方法考虑。因此，使用由此模型计算得到的应力值要格外小心。对这个初步分析中提到的法兰盘的性能问题，应该作更精确的分析。

13.2.2 刚性接触问题实例——塑性加工过程仿真

通过将一个长金属薄板加工成凹型槽的分析，展示接触分析中刚性接触面的应用和成功进行接触分析时常常需要的一些更为复杂的技术。

该问题涉及可变形材料的带材，称之为毛坯，以及与毛坯接触的工具（冲头，冲模和毛坯夹具）。这些工具可以构造成刚性接触面，因为它们的刚度比毛坯刚度大很多。图 13-59 给出了这些部件的基本布局。

图 13-59　模型示意图

厚度为 1mm 的毛坯，在毛坯夹具与冲模之间受挤压。毛坯夹具上的力为 440kN。在成型过程中，这个力与毛坯和毛坯夹具、毛坯和冲模之间的摩擦力共同作用，在成型过程中控制毛坯材料将其拉入冲模。要求确定成型过程中作用在冲头上的力。同时还须评估夹持力以及毛坯与工具间的摩擦系数的设置对于将毛坯加工成型为凹槽是否适合。

采用二维平面应变模型。如果结构在某个方向很长，在该方向上可以假定为没有应变。因为成型过程对凹槽中心的平面是对称的，所以只需取凹槽的一半分析。

各部分的尺寸如图 13-60 所示。

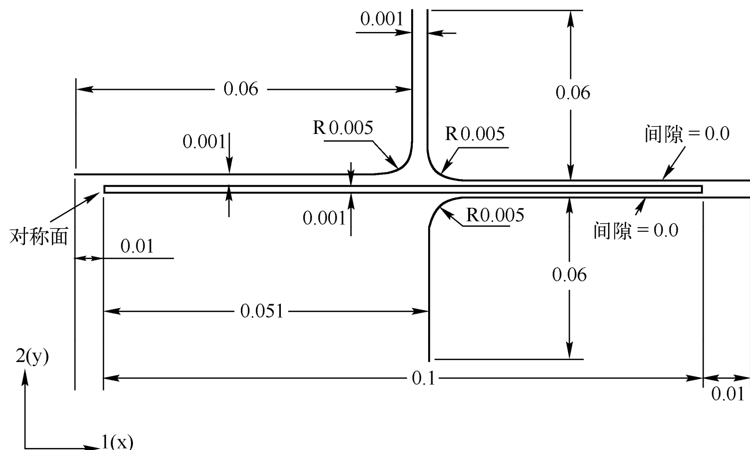


图 13-60　在成型分析中部件的尺寸（单位：米）

本节用 ABAQUS/CAE 创建模型。命令执行文件运行时演示了整个 ABAQUS/CAE 建模过程并完成对该问题的分析。若对下面的说明有问题或希望检查一下工作时，可运行命令执行文件。

若没有 ABAQUS/CAE 或其他前处理器，可以用手工方法创建一个输入文件求解该问题，详细说明请参阅 ABAQUS 用户手册中的相关章节。

（1）启动 ABAQUS/CAE，进入“部件”模块。必须创建四个部件：一个可变形的部件来表示毛坯和三个刚性部件表示各个工具。

首先创建可变形的毛坯。创建一个二维、带有平面壳基本特性的可变形部件代表可变形的毛坯。

部件的大致尺寸取 0.25，命名为“Blank”。在定义几何形状时，用连线工具草绘一个矩形。然后标注其水平和垂直方向的尺寸，编辑这个尺寸以精确定义这个矩形。最终的截面图形如图 13-61 所示，完成以后如图 13-62 所示。

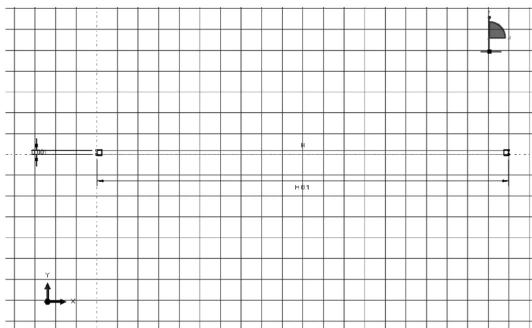


图 13-61 毛坯截面

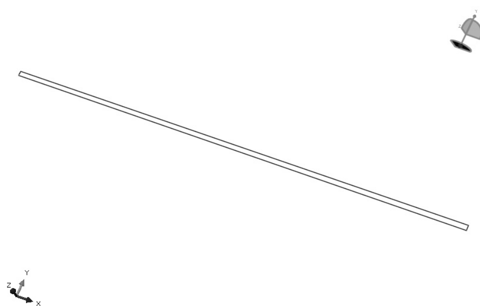


图 13-62 用做截面的壳

然后开始创建刚性工具。对每个刚性工具应分别创建部件。每个部件的创建方法相同，可详细考虑每个工具（例如：冲模）的创建。

创建二维、带有平面线框基本特性的解析刚性部件代表刚性冲模。部件大致尺寸取 0.25，命名为“Die”。在创建部件的几何图形时，可编辑尺寸以定义精确的几何图形。最终图形如图 13-63 所示，单击中键，生成如图 13-64 所示的部件。

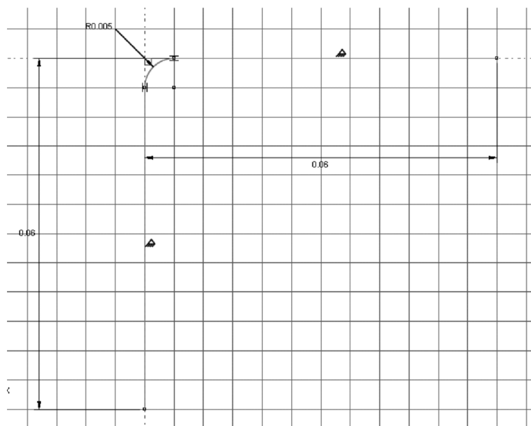


图 13-63 冲模草图（Die 部件草图）

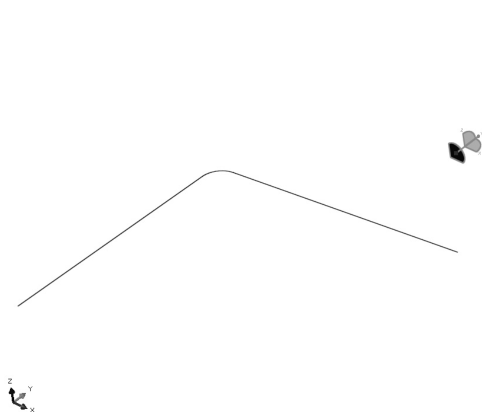


图 13-64 Die 部件

创建刚性体的参考点。从主菜单选择“工具（Tools）→参考点（Reference Point）”，在视图中选择圆弧的圆心点作为这个刚性体的参考点。

用同样的方法创建另外两个解析刚性部件，分别命名为“Holder”和“Punch”，以表现夹具和冲头。它们的几何图形如图 13-65 和图 13-66 所示。并在每个部件圆弧的圆心上创建参考点。

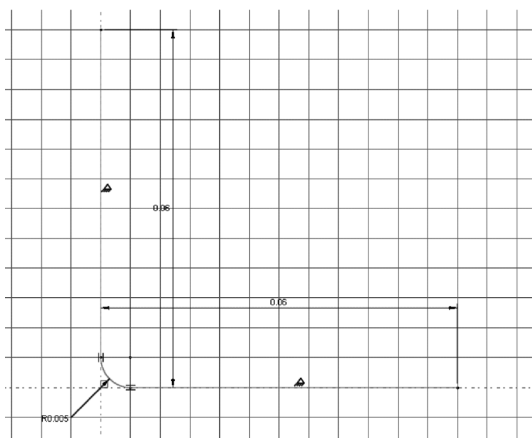


图 13-65　夹具草图（Holder 部件草图）

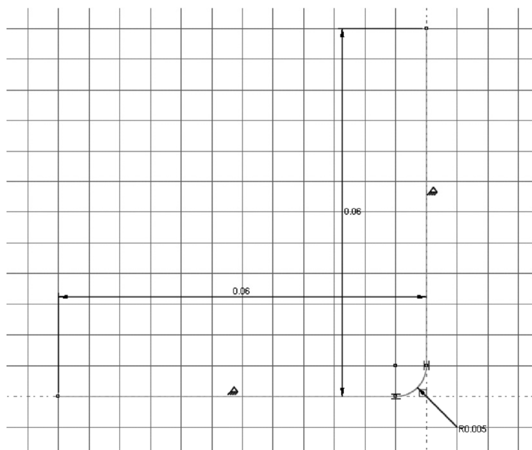


图 13-66　冲头草图（Punch 部件草图）

（2）模型所需部件创建完成后，开始定义材料和截面属性。

毛坯由高强钢制成（E=210GPa，ν=0.3）。该材料在非弹性范围的应力—应变特性如图 13-67 所示。当发生塑性变形时，材料经历了相当大的硬化。在此分析中塑性应变可能会很大；所以，需要提供高达 50%的塑性应变硬化数据。表 13-2 提供了用于输入程序的数据。

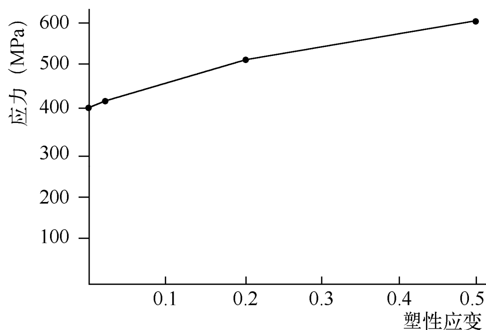


图 13-67　屈服应力与塑性应变的关系

表 13-2　屈服应力与塑性应变数据

屈服应力(Pa)	塑性应变
400.0E6	0.0
420.0E6	2.0E-2
500.0E6	20.0E-2
600.0E6	50.0E-2

下面的命令清楚地展示了材料参数的定义方法。

```
*Material, name=Steel
*Elastic
 2.1e+11, 0.1
*Plastic
    4e+08,     0.
 4.2e+08, 0.02
    5e+08,   0.2
    6e+08,   0.5
```

```
**
```

在“属性”（Property）模块中用这些性质创建名为“Steel”的材料。创建均匀实体的截面属性，并命名为“BlankSection”，截面属性调用“Steel”材料，弹性与塑性的材料输入数据按图 13-68 与图 13-69 进行设置。

数据

	杨氏模量	泊松比
1	2.1E11	0.1

图 13-68　弹性参数

数据

	屈服应力	塑性应变
1	400.0E6	0.0
2	420.0E6	2.0E-2
3	500.0E6	20.0E-2
4	600.0E6	50.0E-2

图 13-69　塑性参数

相应的截面与材料关系设置的命令如下。

```
**毛坯的截面
*Nset, nset=Set-1, generate
    1,   505,      1
*Elset, elset=Set-1, generate
    1,   400,      1
** Section: BlankSection
*Solid Section, elset=Set-1, controls=EC-1, material=Steel
,
**冲模的截面
*Node
      52, 0.00499999989, -0.00499999989,              0.
*Nset, nset=Die-RefPt_, internal
52,
*Elset, elset=Die, generate
   1,   50,     1
**夹具的截面
*Node
      52, 0.00499999989, 0.00499999989,              0.
*Nset, nset=Holder-RefPt_, internal
52,
*Elset, elset=Holder, generate
   1,   50,     1
**冲头的截面
*Node
      52, -0.00499999989, 0.00499999989,              0.
*Nset, nset=Punch-RefPt_, internal
52,
*Elset, elset=Punch, generate
   1,   50,     1
```

（3）毛坯在变形时将经历明显的转动。在一个随着毛坯运动而旋转的坐标系下给出应力和应变值将更容易解释结果。因此，需要建立一个局部坐标系，这个局部坐标系开始时与整体坐标系一致，但是随着单元的变形而移动。

为此，用（创建局部坐标系：三个点，Create Datum CSYS: 3 Points）工具创建一个直角数据坐标系。选择毛坯作为局部坐标赋予的区域，在视窗中单击基准坐标系作为 CSYS（选择 Axis，并接受 0.0 的旋转）。

局部坐标如图 13-70 所示。

（4）为了定义分析的模型，需组装部件。进入到“装配”模块中，首先安装毛坯的实例，再安装和定位刚性工具的实例。

单击，弹出图 13-71 所示的“创建实例”对话框，按住〈Shift〉键选择四个部件，将它们实例化，如图 13-72 所示。

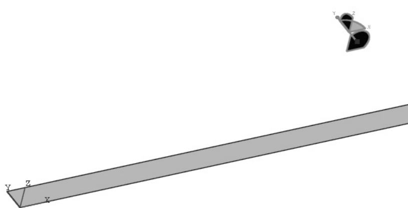


图 13-70 局部坐标



图 13-71 “创建实例”对话框

调整位置关系，确保冲头的左边延展超出毛坯的左边。这个工作很有必要，以避免在接触计算时毛坯上的点落入附在冲头上的刚性接触面的背面。如果必要，返回到“部件”模块中重新定义部件直到达到要求为止。完成的装配应如图 13-73 所示。

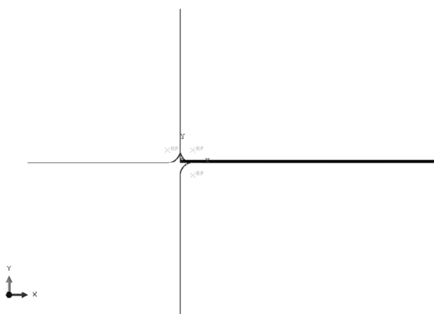


图 13-72 实例化

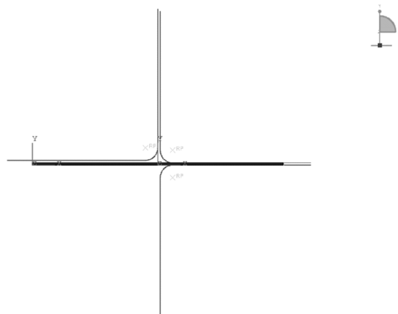


图 13-73 完成装配

在命令中则无需复杂调整，直接定义位置即可。

```
** ASSEMBLY
```

```
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Blank-1, part=Blank
        -0.05,          0.,          0.
*End Instance
**
*Instance, name=Die-1, part=Die
        0.001,          0.,          0.
*End Instance
**
*Instance, name=Holder-1, part=Holder
        0.001,       0.001,          0.
*End Instance
**
*Instance, name=Punch-1, part=Punch
           0.,       0.002,          0.
*End Instance
```

这样就可以直接给定安装位置。

（5）几何集对于指定载荷与边界条件以及控制输出都很方便。下面创建六个几何集：每个刚性体的参考点为一个集，毛坯的对称平面为一个集，毛坯的中面的每个端点为一个集。最后两个集为：上述的位置最初的点；为了满足要求而设置的边分割点。

创建的几何集如下：

- RefPunch 为刚性体冲头的参考点；
- RefHolder 为刚性体夹具参考点；
- RefDie 为刚性体冲模参考点；
- Center 为毛坯的左垂直边（对称平面）。

接着，将毛坯的垂直边对半分割，并对新生成的点创建集，过程如下：

用工具分割毛坯的左右垂直边。对每个边，使用规范化的参数 0.5 把边对半分割开。

毛坯的每个垂直边在其中面上产生了一个点。

在中面左端定义一个集，名为“Midleft”，在中面右端定义一个集，名为“Midright”。

完成的集如图 13-74 所示。

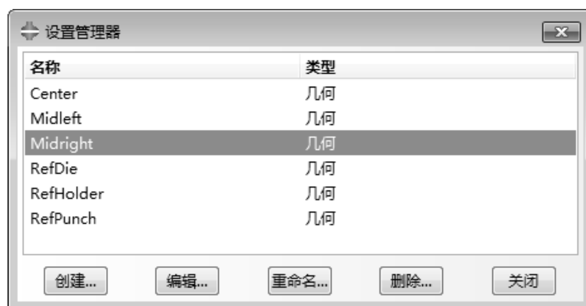


图 13-74 创建完成的集

这些集的创建命令如下。

```
**
*Nset, nset=RefPunch, instance=Punch-1
 52,
*Nset, nset=RefHolder, instance=Holder-1
 52,
*Nset, nset=RefDie, instance=Die-1
 52,
*Nset, nset=Center, instance=Blank-1, generate
   1,   405,   101
*Elset, elset=Center, instance=Blank-1, generate
   1,   301,   100
*Nset, nset=Midleft, instance=Blank-1
 203,
*Nset, nset=Midright, instance=Blank-1
 303,
*Elset, elset=_BlankTop_S3, internal, instance=Blank-1, generate
 301,   400,      1
*Surface, type=ELEMENT, name=BlankTop
_BlankTop_S3, S3
*Elset, elset=_BlankBot_S1, internal, instance=Blank-1, generate
   1,   100,      1
*Surface, type=ELEMENT, name=BlankBot
_BlankBot_S1, S1
*Elset, elset=_DieSurf_SNEG, internal, instance=Die-1, generate
  1,   50,     1
*Surface, type=ELEMENT, name=DieSurf
_DieSurf_SNEG, SNEG
*Elset, elset=_PunchSurf_SNEG, internal, instance=Punch-1, generate
  1,   50,     1
*Surface, type=ELEMENT, name=PunchSurf
_PunchSurf_SNEG, SNEG
*Elset, elset=_HolderSurf_SNEG, internal, instance=Holder-1, generate
  1,   50,     1
*Surface, type=ELEMENT, name=HolderSurf
_HolderSurf_SNEG, SNEG
```

（6）完成创建装配后，进入“分析步”模块。

在接触模拟分析中有两个主要的困难：部件在接触约束起作用之前的部件刚体运动和接触条件突然改变，ABAQUS 在建立接触面的准确的接触状态时，它们会导致严重的非连续迭代。因此，无论如何需采取预防措施避免这些情况发生。

处理刚体运动并不困难。只需简单地确认是否有足够的约束防止模型中各部件的刚体运动即可。这意味着需用初始边界条件达到部件接触，而不是直接施加载荷。这样做可能需要的分析步比预计的多，但能保证求解较平稳地进行下去。

除非是动力冲击分析，ABAQUS 总是尝试在部件间建立合理的平稳接触方式，以避免

大的过约束和接触压力剧烈变化。

再次强调，处理这些问题常用的方法是在整个载荷施加之前，增加额外的分析步使部件进入接触状态。这个方法虽然需要更多的分析步但收敛困难最小，因而使得求解更有效。基于这些观点，现在开始定义这个例题的分析步。

这个模拟过程共有五步。由于模拟过程中涉及材料、几何和边界非线性，必须使用常规分析步。成型过程是个拟静态过程，因此，在整个模拟过程中忽略惯性。下面对每个分析步（包括目的、定义和相关的输出要求的详细的说明）进行简明概述。关于如何施加载荷和边界条件将在后面详细讨论。

■ 分析步 1

在这个分析步中建立毛坯和夹具之间的明确接触关系。在这步中毛坯中面的端点在垂直方向固定以防毛坯的初始移动，用位移边界条件将夹具压在毛坯上。

基于问题拟静态特性和非线性响应的事实，在初始步之后创建一个静态的常规分析步，命名为“Establish contact I”。输入描述项“Push the blank holder and die together”，并包含几何非线性的影响。

这个分析步只用一个增量步，所以初始增量步的时间与分析步的时间相等（例如：1.0）。

为了限制输出量，只在这个分析步结束时输出预选的变量。另外可以删除这个分析步的历程输出要求。如需要跟踪历程的变量，可在随后的分析阶段输出。此外，可以设置将接触的诊断输出到信息文件中。

分析步 1 设置如图 13-75 与图 13-76 所示。



图 13-75 “编辑分析步”基本信息设置

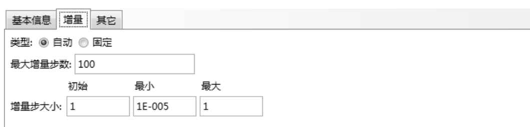


图 13-76 时间增量设置

分析步 1 设置命令如下。

```
**
** STEP: Establish contact I
**
*Step, name="Establish contact I", nlgeom=YES
Push the blank holder and die together
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
**
```

本分析步的输出请求应作如下定义。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
*Monitor, dof=2, node=RefPunch, frequency=1
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
CDISP, CFORCE, CSTATUS, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

■ 分析步 2

因为在第一步中毛坯、夹具和冲模之间的接触关系已建立，毛坯的中面右端的约束不再需要，在第二个静态常规分析步中，应撤除这个约束。

将该步命名为“Remove right constraint”，将其插到“Establish contact I”分析步之后。给出这个分析步的描述项“Remove the middle constraint at right”。

由于第一步考虑了几何非线性效应，这个效应在第二步和随后的常规分析步将自动地继续起作用，不能撤除。

因为在这个分析步中只是撤除毛坯上的垂直向的约束，所以只需一个时间增量步，设置初始时间增量步与该分析步的时间相等（再次设为 1.0）。上一步的变量输出要求遗传到该步。同样在该步要求输出接触的诊断信息。

分析步 2 设置如图 13-77 与图 13-78 所示。

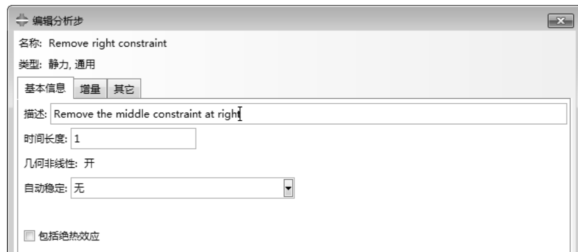


图 13-77 “编辑分析步”基本信息设置



图 13-78 “其它”选项卡设置

分析步 2 设置命令如下。

```
**
** STEP: Remove right constraint
**
*Step, name="Remove right constraint", nlgeom=YES
Remove the middle constraint at right
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
**
```

本分析步的输出请求应作如下定义。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
CDISP, CFORCE, CSTATUS, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

■ 分析步 3

在成型过程中，夹具的夹持力的大小是一个控制因素，因此在分析中应该作为一个可变载荷来定义。在第 3 个分析步中使用边界条件代替力载荷向下移动夹具。

创建第 3 个静态的常规分析步，命名为“Holder force”，插在“Remove right constraint”步之后。该分析步同样用一个时间增量步就可完成，再次将初始时间增量步的时间设为该分析步的总时间。要求输出该步的接触诊断信息。

分析步 3 设置如图 13-79 与图 13-80 所示。

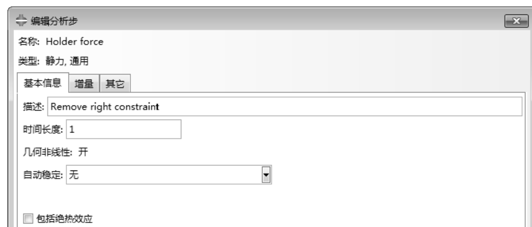


图 13-79 “编辑分析步”基本信息设置

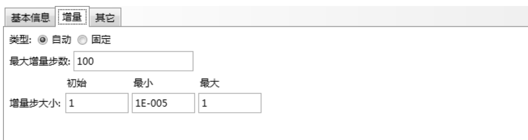


图 13-80 时间增量设置

分析步 3 设置命令如下。

```
**
** STEP: Holder force
**
*Step, name="Holder force", nlgeom=YES
Remove right constraint
*Static
1., 1., 1e-05, 1.
**
```

本分析步的输出请求如下。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
CDISP, CFORCE, CSTATUS, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

■ 分析步 4

在分析开始时，冲头和毛坯是分开的，这是为了避免在建立毛坯、夹具和冲模之间接触关系时出现干涉。在第 4 个分析步中，沿 2 方向向下移动冲头直到足以与毛坯接触为止。

另外撤除毛坯的中面左端的垂向约束，并施加一个小压力在毛坯顶面上，将其拉向冲头的接触面。

创建第 4 个静态的常规分析步，命名为“Establish contact II”，插在“Holder force”步之后。

给出这个分析步的描述项为“Move the punch down a little while applying a small pressure to blank top”。由于该分析步的接触状态变强，设置初始增量步的时间为该分析步时间的 10%。

要求输出第 4 步的接触诊断信息。另外要求输出冲头参考点（几何集 RefPunch）的反力在每个时间增量步中的历程数据。

分析步 4 设置如图 13-81 与图 13-82 所示。

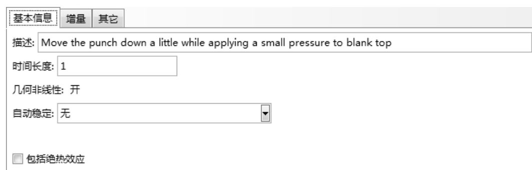


图 13-81 “编辑分析步”基本信息设置

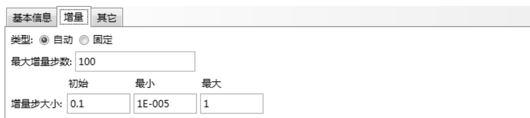


图 13-82 时间增量设置

分析步 4 设置命令如下。

```
**
** STEP: Establish contact II
**
*Step, name="Establish contact II", nlgeom=YES
Move the punch down a little while applying a small pressure to blank top
*Static
0.1, 1., 1e-05, 1.
**
```

本分析步的输出请求应定义如下。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
CDISP, CFORCE, CSTATUS, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

■ 分析步 5

在第 5 个分析步也就是最后的分析步中，作用在毛坯上的压力要撤除，冲头向下移动完成成型操作。

创建一个静态常规分析步，命名为“Move punch”，插在“Establish contact II”步之后。

在该分析步描述项中输入“Full extent”。由于存在摩擦滑移、接触状态变化和材料非线性行为等因素，该分析步中存在强非线性。因此，最大增量步数设置为一个大值（例如：1000）。初始时间增量步步长设为 0.0001，该分析步的时间设为 1.0，最小时间增量步步长设

为 1e−06。

用这些设置参数，ABAQUS 在高度非线性分析时段采用较小的时间增量，保证分析不至于中止。指定每 20 个增量步输出一次预选的变量。上一步输出冲头的反力要求遗传到该步。指定输出接触诊断的要求。另外在第五个分析步中要求每 200 个时间增量步输出一次重启动文件。用户可要求 ABAQUS 监控选定点的某个自由度的值。这个自由度的值在“作业监控器”中显示，在每个增量步中写入状态文件（.sta）并在指定的增量步中写入信息文件（.msg）。另外，在提交分析时将产生一个新的视窗，在这个视窗中会出现该自由度的历程曲线。可用该信息监控求解过程。

分析步 5 设置如图 13−83 与图 13−84 所示。



图 13−83 “编辑分析步”基本信息设置

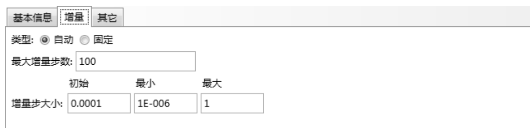


图 13−84 时间增量设置

这个模型要求监控冲头参考点在整个过程中的垂向位移（自由度 2）。在运行之前，从工具栏下方的“分析步”表中选择第一个分析步（Establish contact I），激活该步。对该步的监控请求将自动遗传到其后的所有步。

分析步 5 设置命令如下。

```
**
** STEP: Move punch
**
*Step, name="Move punch", nlgeom=YES
Full extent
*Static
0.0001, 1., 1e-06, 1.
**
```

本分析步是加载的主要过程，输出请求定义如下。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
CF, RF, U
*Element Output, directions=YES
```

```
LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
CDISP, CFORCE, CSTATUS, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
```

（7）完成分析步定义后，选择要监控的自由度。从主菜单上选择“输出（Output）→自由度监控器（DOF Monitor）”。弹出“自由度监控器”对话框按图 13-85 设置。

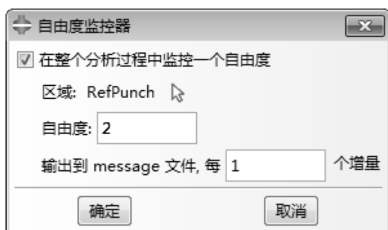


图 13-85 “自由度监控器”对话框



图 13-86 “区域选择”对话框

单击按钮，弹出图 13-86 所示的“区域选择”对话框，选择“RefPunch”，单击“确定”，回到图 13-85 所示的“自由度监控器”对话框，输入自由度“2”，单击“确定”完成。

（8）接下来进入“相互作用”模块，定义接触。

必须定义毛坯的顶部与冲头的接触、毛坯的顶部与夹具的接触和毛坯的底部与冲模的接触。在这些接触相互作用中，刚性接触面必须为主面。每个接触相互作用必须调用它所服从相互作用行为的接触相互作用的属性。

在该例中，假定毛坯与冲头间的摩擦系数为零。毛坯与其他两个工具的摩擦系数为 0.1。因此两个接触相互作用的属性必须定义为：一个有摩擦，一个没有摩擦。

在“相互作用”（Interaction）模块中定义以下的面：毛坯顶面为 BlankTop；毛坯底面为 BlankBot；朝向毛坯的冲模面为 DieSurf；朝向毛坯的夹具面为 HolderSurf；朝向毛坯的冲头面为 PunchSurf。

完成定义的表面如图 13-87 所示。

接着，定义两个接触相互作用的属性。第一个属性名为“NoFric”；因为无摩擦接触是 ABAQUS 默认的，接受切向行为默认值如图 13-88 所示。

第二个属性命名为“Fric”，对这个属性用摩擦系数为 0.1 的罚函数（Penalty）摩擦公式，如图 13-89 所示。定义命令如下。



图 13-87　创建表面



图 13-88　无摩擦的接触属性



图 13-89　有摩擦的接触属性

```
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=Fric
1.,
*Friction, slip tolerance=0.005
 0.1,
*Surface Interaction, name=NoFric
1.,
**
```

最后定义接触面之间相互作用及调用合适的接触相互作用属性。在初始步中定义各种情况的相互作用并采用默认的有限滑移公式（Surface-to-surface contact (Standard)）。所定义相互作用如下。

■ 冲模—毛坯间的接触面：DieSurf（主）和 BlankBot（从）调用 Fric 接触相互作用属性，如图 13-90 所示。定义命令如下。

```
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Die-Blank
*Contact Pair, interaction=Fric, type=SURFACE TO SURFACE
BlankBot, DieSurf
```

■ 夹具—毛坯间的接触面：HolderSurf（主）和 BlankTop（从）调用 Fric 接触相互作用属性，如图 13-91 所示。定义命令如下。

```
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Holder-Blank
*Contact Pair, interaction=Fric, type=SURFACE TO SURFACE
BlankTop, HolderSurf
```

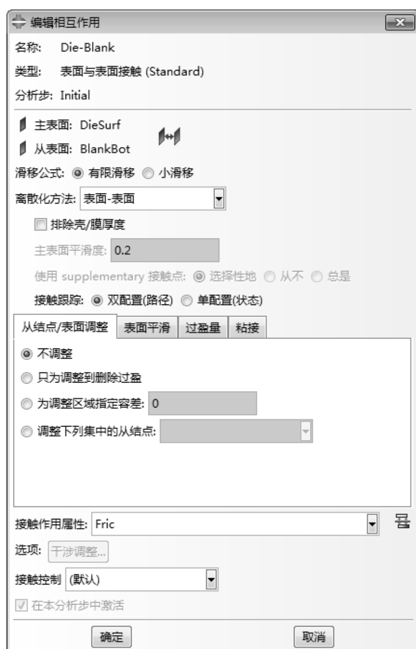


图 13-90 Die-Blank 的属性设置

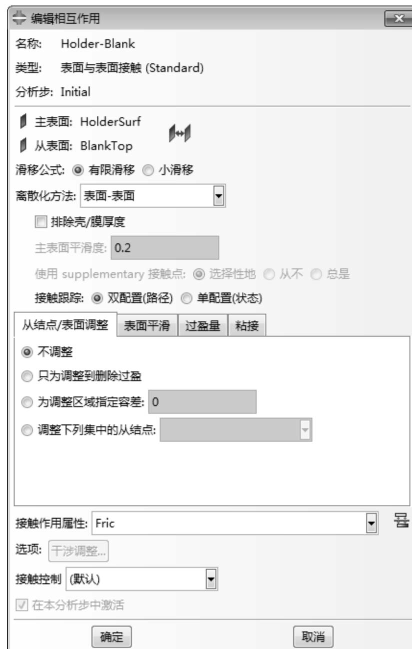


图 13-91 Holder-Blank 的属性设置

■ 冲头—毛坯间的接触面：PunchSurf（主）和 BlankTop（从）调用 NoFric 接触相互作用属性，如图 13-92 所示。定义命令如下。

```
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Punch-Blank
*Contact Pair, interaction=NoFric, type=SURFACE TO SURFACE
BlankTop, PunchSurf
```

“相互作用管理器”显示了初始步中创建的各相互作用情况，如图 13-93 所示。

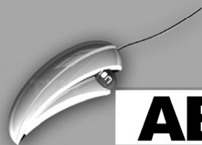
定义完边界后模型如图 13-94 所示。

（9）下面定义边界条件。

■ 分析步 1 的边界条件

回忆一下，整个加工过程的第一阶段是夹具和冲模夹持毛坯。在第一个时间增量步的起点，即使初始时刻接触面是重合的，但各部件之间并没有建立接触关系。

当接触没有完全建立时会出现问题：部件可能有刚体运动；或接触状态在开与合之间震



颤（chattering）。对于多部件接触分析，这种震颤是非常普遍的。

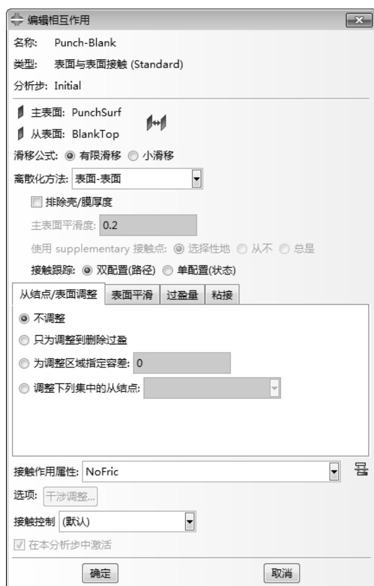


图 13-92　Punch-Blank 的属性设置



图 13-93　“相互作用管理器”对话框

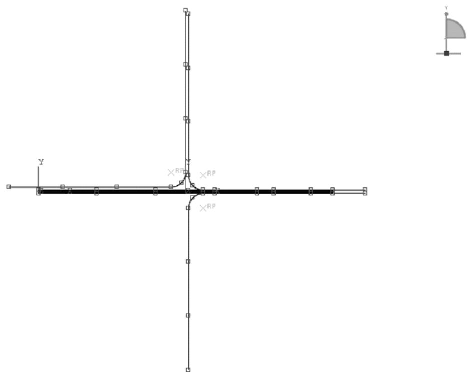


图 13-94　设置接触

为了避免分析过程中的刚体运动和震颤，需固定毛坯的中面端点的垂向以防止初始移动。采用中面端点是因为约束不能加在接触面上。

如果在接触区域的接触方向使用边界条件约束，就会产生一个自由度施加两个约束的情况。这会引起数值问题，ABAQUS 可能在信息文件中发布零主元的出错信息。建立接触的方法之一是对夹具加力。然而由于夹具与毛坯之间的接触关系还没有完全建立，可能会引起夹具的刚体运动。因此最好是通过施加位移的方法移动夹具，这样就可以确保夹具与毛坯之间的接触。

另外还需稍微向上移动冲模建立冲模与毛坯之间的良好接触。施加的位移值要大到能建立良好的接触，但也不能产生塑性屈服。

约束住夹具和冲模的 1 和 6 自由度，自由度 6 为模型在平面内的旋转自由度。刚性面的

所有的边界条件都加在各自刚性体参考点上。此时，冲头被完全约束，毛坯在其对称面（几何集 Center）上施加对称约束。

表 13-3 分析步 1 中的边界条件一览表概括了这个分析步的边界条件。

表 13-3　分析步 1 中的边界条件一览表

边 界 名 称	几　何　集	边 界 条 件
CenterBC	Center	XSYMM
RefDieBC	RefDie	U1 = UR3 = 0.0, U2 = 1.E-08
RefHolderBC	RefHolder	U1 = UR3 = 0.0, U2 = −1.E-08
RefPunchBC	RefPunch	U1 = U2 = UR3 = 0.0
MidleftBC	Midleft	U2 = 0.0
MidrightBC	Midright	U2 = 0.0

在图 13-95 所示的“边界条件管理器”中可以看到分析步 1 的边界条件。定义好边界的模型如图 13-96 所示。

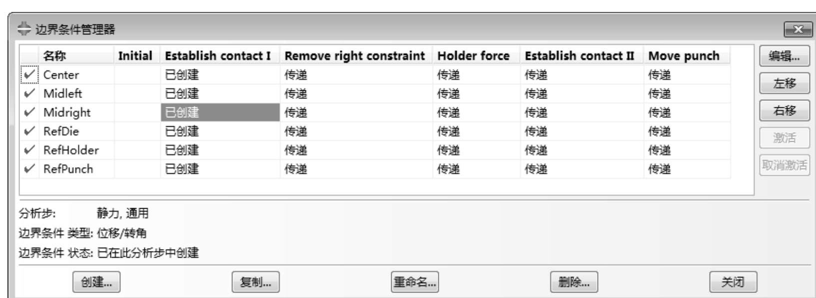


图 13-95　“边界条件管理器”对话框

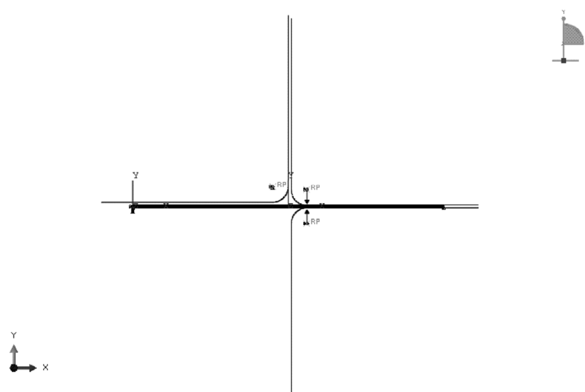


图 13-96　分析步 1 中施加边界

使用命令定义方法如下。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
```

```
**
** Name: CenterBC Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary
Center, XSYMM
** Name: MidleftBC Type: 位移/转角
*Boundary
Midleft, 2, 2
** Name: MidrightBC Type: 位移/转角
*Boundary
Midright, 2, 2
** Name: RefDieBC Type: 位移/转角
*Boundary
RefDie, 1, 1
RefDie, 2, 2, 1e-08
RefDie, 6, 6
** Name: RefHolderBC Type: 位移/转角
*Boundary
RefHolder, 1, 1
RefHolder, 2, 2, -1e-08
RefHolder, 6, 6
** Name: RefPunchBC Type: 位移/转角
*Boundary
RefPunch, 1, 1
RefPunch, 2, 2
RefPunch, 6, 6
**
```

■ 分析步 2 的边界条件

第一步中毛坯与夹具和冲模之间的接触关系已经建立，且完全约束毛坯在 2 方向的自由度。因而现在需解除毛坯的中面右端的约束。打开“边界条件管理器”（Boundary Condition Manager）对话框，并单击位于“Remove right constraint”下方边界条件“MidrightBC”行的单元。单击对话框右边的“取消激活”（Deactivate）。如图 13-97 所示。



图 13-97　分析步 2 中的取消激活 MidRightBC

在命令中的定义如下。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: CenterBC Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary, op=NEW
Center, XSYMM
** Name: MidleftBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
Midleft, 2, 2
** Name: MidrightBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
** Name: RefDieBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefDie, 1, 1
RefDie, 2, 2, 1e-08
RefDie, 6, 6
** Name: RefHolderBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefHolder, 1, 1
RefHolder, 2, 2, -1e-08
RefHolder, 6, 6
** Name: RefPunchBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefPunch, 1, 1
RefPunch, 2, 2
RefPunch, 6, 6
**
```

■ 分析步 3 的加载与边界条件

在该分析步，撤除用于夹具向下移动的边界条件，代之以一个集中力。由于夹具与毛坯之间的接触良好，以集中力替代夹具上的位移边界条件不会出现任何问题。在该分析中，夹具的夹持力为 440kN。一般而言，应该确保新施加的力与边界条件产生的反力在一个量级上，这样接触状态不会发生剧烈的变化。

在分析步 3 中用“边界条件管理器”（Boundary Condition Manager）编辑“RefHolderBC”边界条件以撤除 U2 的约束。

从主菜单选择按钮创建集中力，命名为“RefHolderForce”。在“Holder force”步对“RefHolder”集施加载荷，为 CF2 输入值“-4.4e5”，在分析步间的传递关系如图 13-98 所示。

命令定义方法如下。

```
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: CenterBC Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary, op=NEW
Center, XSYMM
```



图 13-98 载荷与传递状态

```
** Name: MidleftBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
Midleft, 2, 2
** Name: RefDieBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefDie, 1, 1
RefDie, 2, 2, 1e-08
RefDie, 6, 6
** Name: RefHolderBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefHolder, 1, 1
RefHolder, 6, 6
** Name: RefPunchBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefPunch, 1, 1
RefPunch, 2, 2
RefPunch, 6, 6
**
** LOADS
**
** Name: RefHolderForce    Type: Concentrated force
*Cload
RefHolder, 2, -440000.
**
```

■ 分析步 4 的加载与边界条件

在这一步沿 2 方向向下移动冲头直到恰好与毛坯接触。撤出 Midleft 集的垂向约束，在毛坯的顶部施加一个小的压力，将毛坯拉向冲头的接触面。

在分析步 4 中用“边界条件管理器”解除“MidleftBC”的边界条件，并改变“RefPunchBC”的边界条件，在 U2 输入“-0.001”。

选取合适的压力大小可能有困难。在该分析中选用了一个小于夹持力三个数量级的压力（1000Pa）。

由于正压力是压向表面，然而在该分析中压力作用要求是背离表面，所以用负压力。这个方法可以防止 BlankTop 和 Punch 面的接触在开闭状态之间震颤。

从“载荷管理器”中选择“创建”，创建一个力学类别下的压强载荷，命名为“Small Pressure”。在“Establish contact II”步将载荷加到“BlankTop”面上，输入值为“−1E3”。

此时载荷与边界的传递关系如图 13-99 所示。

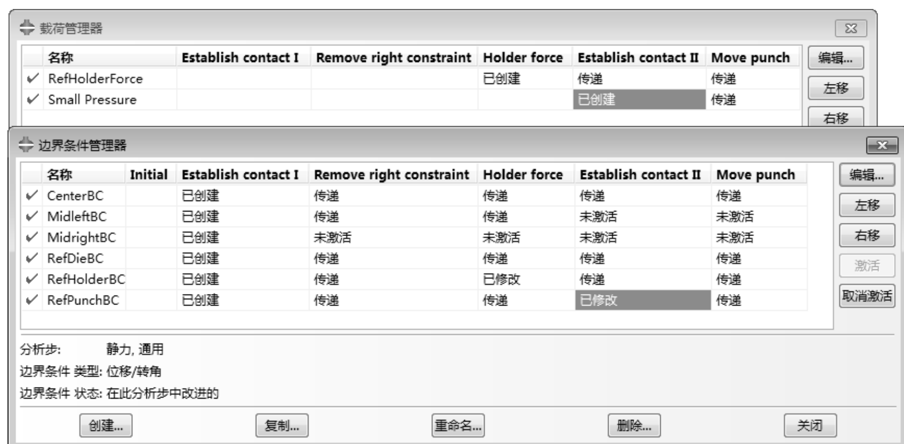


图 13-99　载荷与边界的传递关系

定义边界与载荷的命令如下。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: CenterBC Type: 对称/反对称/完全固定
*Boundary, op=NEW
Center, XSYMM
** Name: MidleftBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
** Name: RefDieBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefDie, 1, 1
RefDie, 2, 2, 1e-08
RefDie, 6, 6
** Name: RefHolderBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefHolder, 1, 1
RefHolder, 6, 6
** Name: RefPunchBC Type: 位移/转角
*Boundary, op=NEW
RefPunch, 1, 1
RefPunch, 2, 2, -0.001
RefPunch, 6, 6
**
** LOADS
**
```

```
** Name: Small Pressure      Type: Pressure
*Dsload
BlankTop, P, -1000.
**
```

■ 分析步 5 的加载与边界条件

在第 5 步中撤除施加在 BlankTop 面上的分布力，向下移动冲头完成成型操作。在静态分析步中卸去压力载荷时，力值在这个分析步内是逐渐均匀下降到零的。

因而这个分布力将继续拉着 BlankTop 面紧紧靠着冲头，维持两个接触面的接触，尤其在这个分析步的早期。这有助于阻止冲头与毛坯在成型初期接触状态无休止地开闭振荡。只要这个压力小到不足以与使冲头向下移动的力相比，则它对解的影响很小。

在该步中，用“载荷管理器”（Load Manager）卸去“Small pressure”载荷。用“边界条件管理器”（Boundary Condition Manager）编辑“RefPunchBC”边界条件，对 U2 输入值“-0.031”。

使用命令的方法如下。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: RefPunchBC Type:  位移/转角
*Boundary
RefPunch, 2, 2, -0.031
**
** LOADS
**
** Name: Small Pressure      Type: Pressure
*Dsload, op=NEW
**
```

图 13-100 的初始分析步、图 13-101 的“Establish contact I”的边界与载荷、图 13-102 的“Remove right constraint”的边界与载荷、图 13-103 的“Holder force”分析步的边界与载荷、图 13-104 的“Establish contact II”的边界与载荷及图 13-105 的“Move punch”的边界与载荷展示了从初始分析步开始，运行 5 个由用户定义的分析步，总计 6 个分析步的边界与载荷的变化。

（10）接着进行网格的定义。

在设计网格之前应选择单元类型。使用先前法兰例题的选择过程，选取非协调单元。毛坯的网格使用了两排 CPE4I 单元（见图 13-106），以便得到毛坯沿厚度方向变形的较好解。

工具如果是用解析刚性接触面来模拟的，则无需剖分网格。如果工具是用离散的刚性接触面模拟的，为了避免收敛问题，网格应剖分得足够细。

使用离散刚性接触面时，需要用足够数量的单元建造倒角处的模型。例如，如果用 R2D2 单元模拟冲模，在倒角处至少要用 10 个单元模拟。这样产生的接触面才足够光滑，可以精确反映倒角处的几何形状。如图 13-107 所示为冲头的种子。

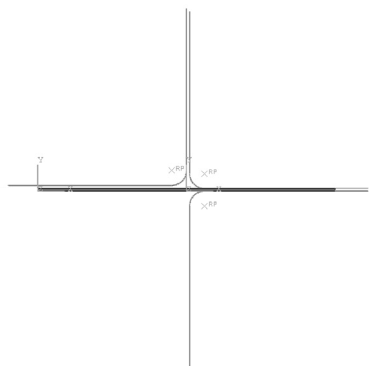


图 13-100 初始分析步

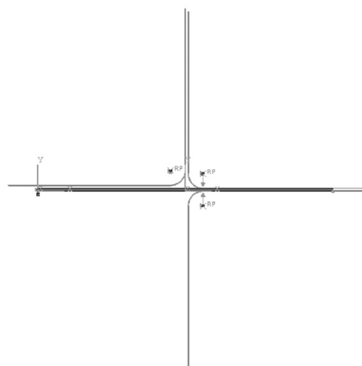


图 13-101 “Establish contact I”的边界与载荷

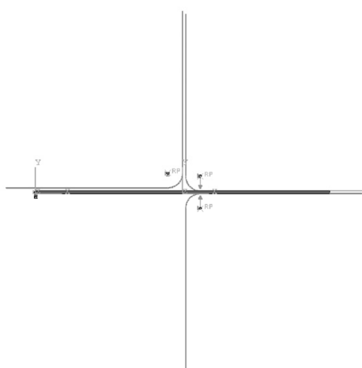


图 13-102 “Remove right constraint”的边界与载荷

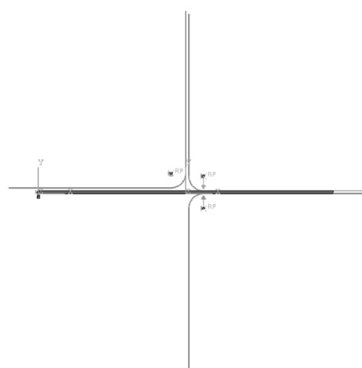


图 13-103 “Holder force”的边界与载荷

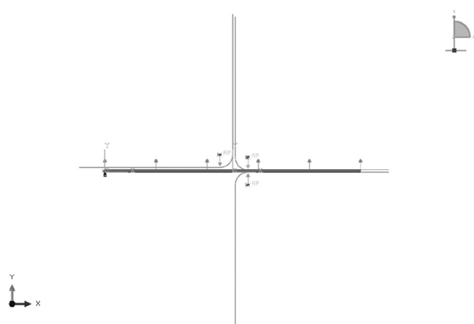


图 13-104 “Establish contact II”的边界与载荷



图 13-105 “Move punch”的边界与载荷

在“网格”（Mesh）模块中用 CPE4I 单元剖分毛坯。在每条边布置的单元剖分数为：沿毛坯的水平边为 100 份，垂直边为 2 份。

此时需要用到网格属性控制命令如下。

```
**
** ELEMENT CONTROLS
**
```

```
*Section Controls, name=EC-1, hourglass=ENHANCED
1., 1., 1.
**
```

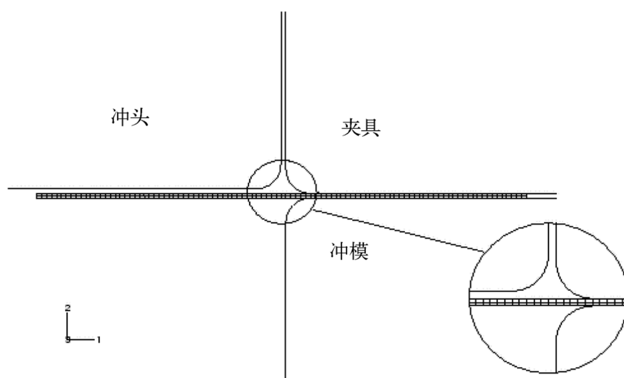


图 13-106 网格规划

由于垂直边在先前被分割过，实际上每个垂直边有 4 个单元。如图 13-108 所示为毛坯的单元划分情况。



图 13-107　冲头的种子

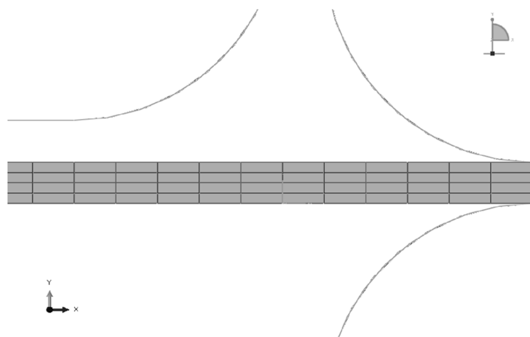


图 13-108　网格细节

（11）在“作业”（Job）模块中创建名为“Channel”的作业。作业描述项输入“Analysis of the forming of a channel”。将模型保存到数据库文件中，提交作业进行分析，监控求解过程，依据检测到的错误修改模型，并分析警告信息产生的原因。

一旦分析开始，所选自由度（冲头垂直位移）的 X-Y 曲线会在另一个视窗中出现。跟踪冲头在 2 方向位移随分析运行时间的变化（可能需要向右滚动来观察这条曲线）。

本例模型几何形状简单，分析步设置繁杂，适宜采用 INP 文件直接编写，请读者参考光盘中的完整 INP 文件。

在 ABAQUS 中，接触分析一般比其他类型的分析更为困难。因此，理解所有的有效选项十分重要，它有助于接触分析的掌握。

如果一个接触分析出现了问题，首先要检查接触面的定义是否正确。最简单的方法是运行 datacheck 分析和在“可视化”模块中显示接触面的法向。可在变形或未变形的图形上显

示接触面和结构单元所有的法线。即在 Undeformed Shape Plot Options 或 Deformed Shape Plot Options 中使用 Normals 选项来做这个工作，以确定接触面的法向方向是否正确。

即使接触面的定义完全正确，ABAQUS 进行接触分析仍可能存在一些问题。这些问题的原因之一可能是默认的收敛准则和迭代次数的限制太苛刻。

接触分析时，有时最好让 ABAQUS 多迭代几次，不要轻易放弃增量或重新再试。这就是在分析中 ABAQUS 区分严重不连续迭代和平衡迭代的原因。

输出诊断接触信息对于每一个接触分析增量步几乎都是十分必要的。在信息文件中，这个选项提供的信息可以用于发现错误和问题，是极为重要的。例如，若所有的严重不连续迭代都涉及同一个从属结点，则可以发现，接触在开闭状态之间震颤。看到这一点后，就必须修改该结点周围的网格或在模型上增加约束。信息文件中的接触数据同样可以识别只有单一从属结点与接触面相互作用的区域，这是非常不稳定的状态，可能会引起收敛问题。应该修改模型，在这类区域内增加一些单元。

完成这个分析需要执行 200 多个增量步。状态文件的开始部分显示如下。冲头的位移值在 DOF MONITOR 列。

```
SUMMARY OF JOB INFORMATION:
 MONITOR NODE: 306   DOF:   2
 STEP   INC ATT SEVERE EQUIL TOTAL   TOTAL   STEP     INC OF     DOFIF
    DISCON ITERS ITERS   TIME/TIME/LPFTIME/LPFMONITOR RIKS
    ITERS     FREQ
    1 1     1 0 2 2   1.00     1.00     1.000     0.00
    2 1     1 0 2 2   2.00     1.00     1.000     0.00
    3 1     1 0 3 3   3.00     1.00     1.000     0.00
    4 1     1 0 2 2   3.10     0.100    0.1000 −0.000100
    4 2     1 0 1 1   3.20     0.200    0.1000 −0.000200
    4 3     1 0 1 1   3.35     0.350    0.1500 −0.000350
    4 4     1 0 1 1   3.58     0.575    0.2250 −0.000575
    4 5     1 0 1 1   3.91     0.913    0.3375 −0.000913
    4 6     1 3 1 4   4.00     1.00     0.08750−0.00100
    5 1     4 8 1 9   4.00     1.56e−06     1.563e−06    −0.00100
    5 2     1 3 1 4   4.00     3.13e−06     1.563e−06    −0.00100
```

分析步 5 的第 1 个增量步是 ABAQUS 确定接触状态非常困难的时期。在找到 PunchSurf 和 BlankTop 接触合适关系之前，要做四次尝试。一旦找到正确的关系，ABAQUS 只需一个迭代步就可以达到平衡。在越过困难的初始时期之后，ABAQUS 迅速增加增量步长以达到一个更合理的步长值。状态文件结尾部分显示如下：

```
5    221    1 2 5 7   4.95    0.951   0.006528     −0.0286
5    222    1 2 3 5   4.96    0.958   0.006528     −0.0288
5    223    1 2 2 4   4.96    0.964   0.006528     −0.0290
5    224    1 1 4 5   4.97    0.974   0.009792     −0.0292
5    225    2 1 4 5   4.98    0.978   0.003672     −0.0294
5    226    1 1 4 5   4.98    0.983   0.005508     −0.0295
5    227    1 4 4 8   4.99    0.991   0.008262     −0.0298
```

5	228	2 1 3 4	4.99	0.994	0.002128	−0.0298
5	229	1 0 3 3	5.00	0.997	0.003192	−0.0299
5	230	1 1 2 3	5.00	1.00	0.003192	−0.0300

THE ANALYSIS HAS COMPLETED SUCCESSFULLY

与之前的例题有所不同，这个分析有许多严重不连续迭代。由于分析中的迭代数太多，信息文件相当大。

尽管限制写入这个文件的信息量可以节省大量的磁盘空间，但是一般来说不应该这样做，因为这些信息是 ABAQUS 在分析中提供诊断数据的主要来源。

（12）进入“可视化”（Visualization）模块，打开 Channel.odb 文件。

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 分析步时的应力云图，如图 13-109 所示。Remove right Constraint 分析步的应力云图如图 13-110 所示。由图 13-109 与图 13-110 分布可见无显著区别，但数值上有变化。

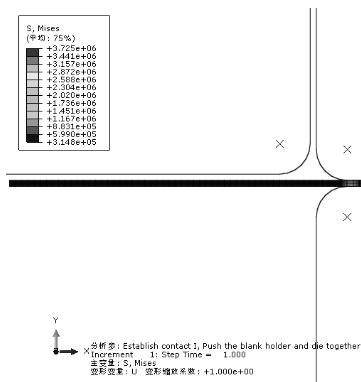


图 13-109　Establish contact I 分析步应力云图

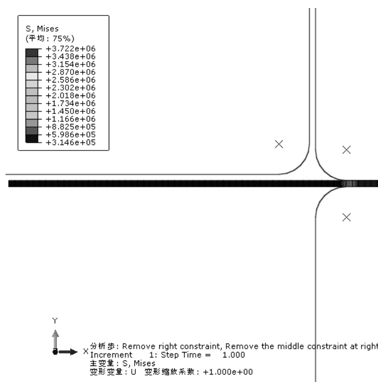


图 13-110　Remove right constraint 分析步应力云图

Holder force 分析步的应力云图如图 13-111 所示，Establish contact II 分析步应力云图分布如图 13-112 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应力变化。

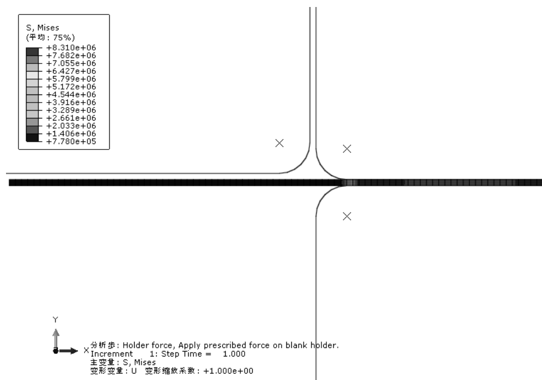


图 13-111　Holder force 分析步应力云图

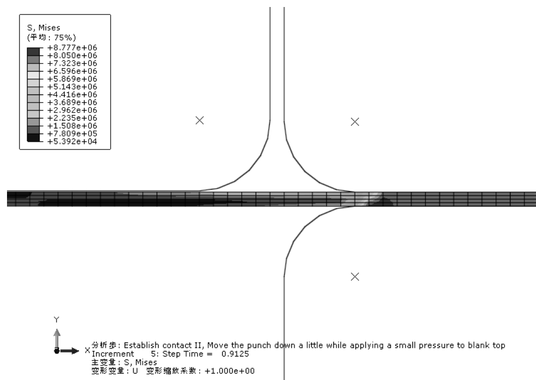


图 13-112　Establish contact II 分析步应力云图

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应力云图如图 13-113 所示，材料开始发生明显的

变形。随着分析的进行，INC=32 时应力云图如图 13-114 所示，应力集中增大。

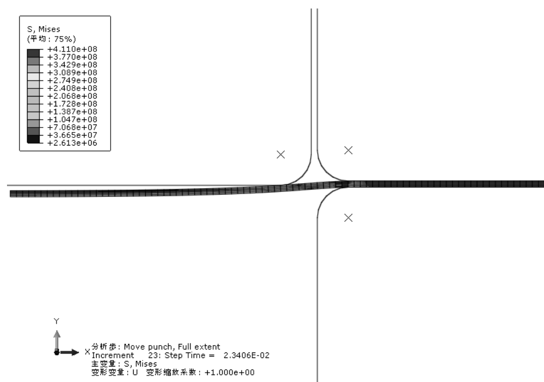


图 13-113 Move punch 分析步，INC=23 时应力云图

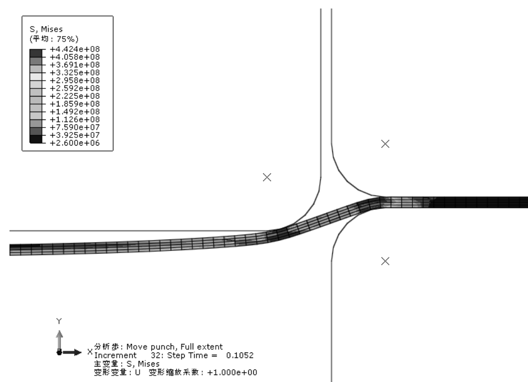


图 13-114 Move punch 分析步，INC=32 时应力云图

INC=60 时应力云图如图 13-115 所示，应力大且分布集中。INC=66 时应力云图如图 13-116 所示，高应力区域分离。

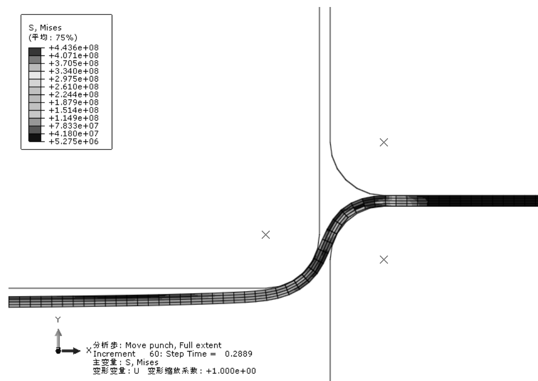


图 13-115 Move punch 分析步，INC=60 时应力云图

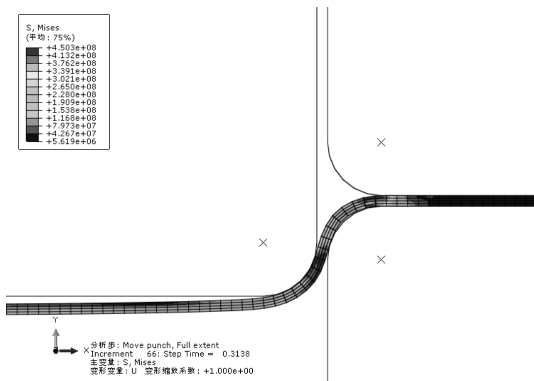


图 13-116 Move punch 分析步，INC=66 时应力云图

INC=97 时应力云图如图 13-117 所示，对称面位置未接触。INC=115 时应力云图如图 13-118 所示，形状基本成形。

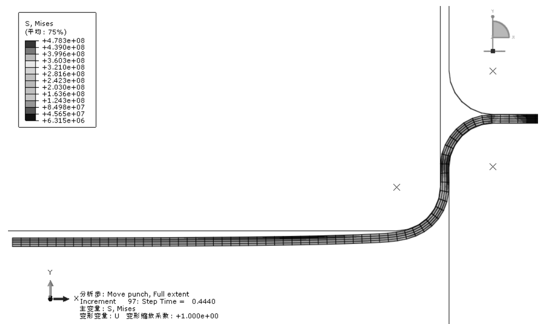


图 13-117 Move punch 分析步，INC=97 时应力云图

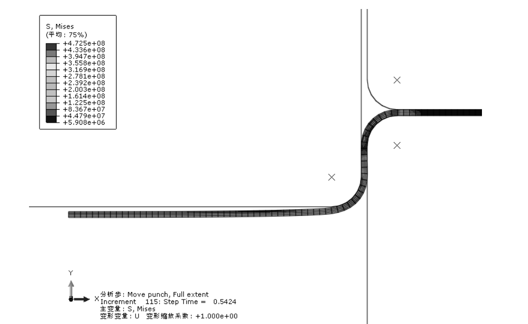


图 13-118 Move punch 分析步，INC=115 时应力云图

INC=180 时应力云图，如图 13-119 所示。INC=215，即完成加工时的应力云图，如

图 13-120 所示。

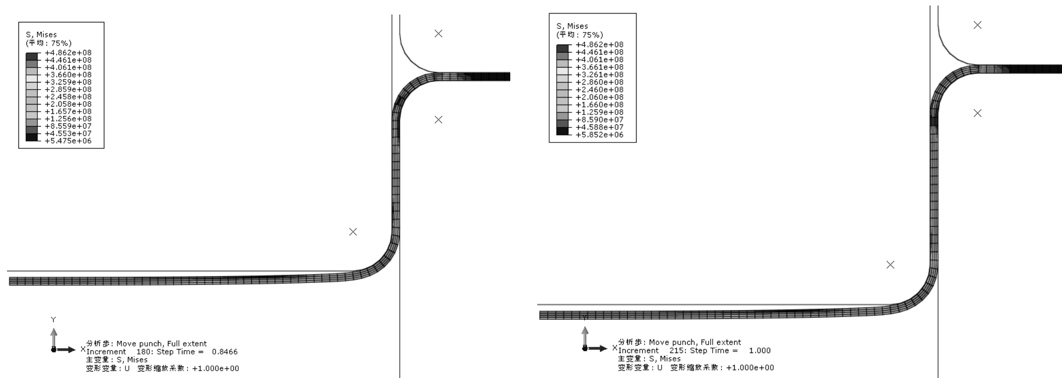


图 13-119 Move punch 分析步，INC=180 时应力云图　图 13-120 Move punch 分析步，INC=215 时应力云图

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 时的应变云图如图 13-121 所示。Remove right Constraint 分析步的应变云图如图 13-122 所示。由图 13-121 与图 13-122 分布可见无显著区别，此时还没有变形。

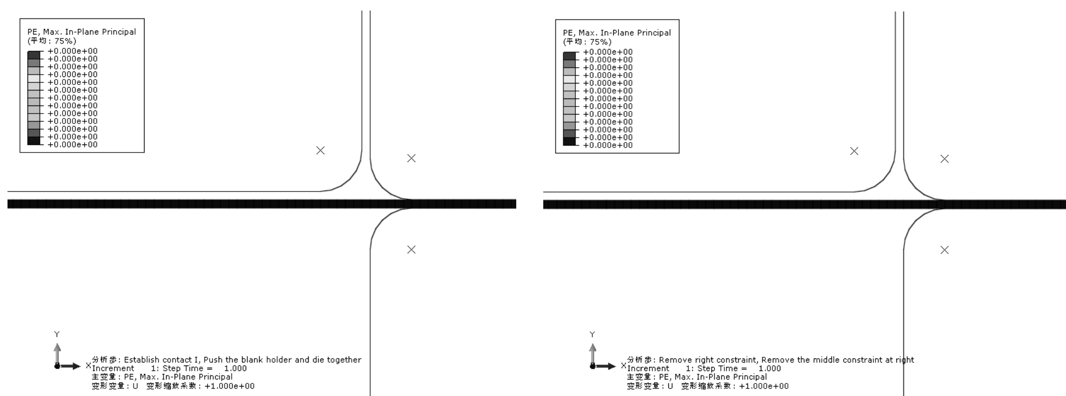


图 13-121 Establish contact I 分析步应力云图　图 13-122 Remove right constraint 分析步应变云图

Holder force 分析步的应变云图如图 13-123 所示，Establish contact II 分析步应变云图如图 13-124 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应变变化。

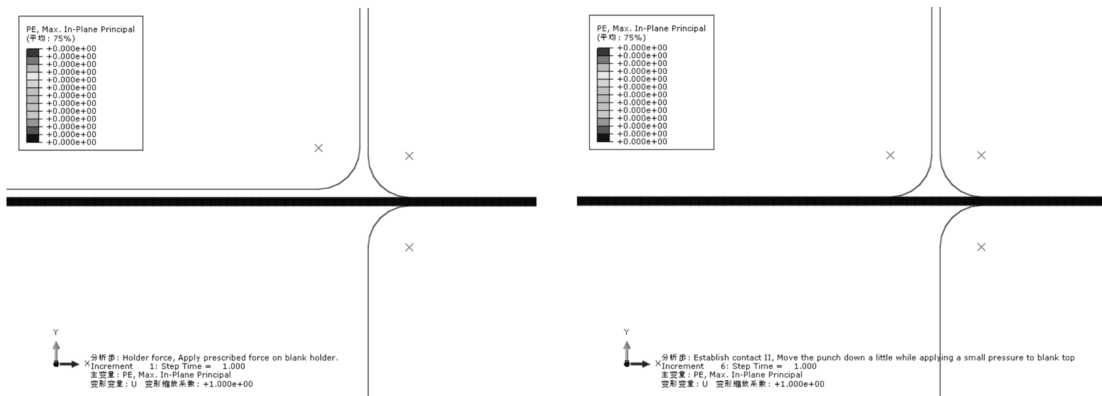


图 13-123 Holder force 分析步应变云图　图 13-124 Establish contact II 分析步应变云图

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应变云图如图 13-125 所示，材料开始发生明显的变形。INC=32 时应变云图如图 13-126 所示，变形增大。

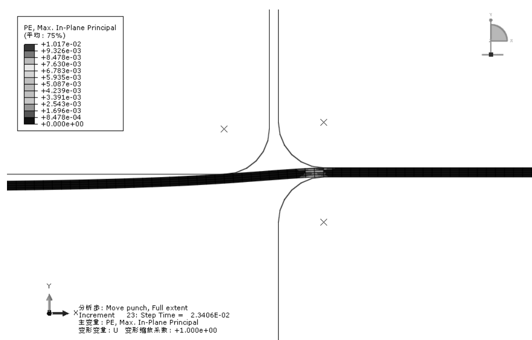


图 13-125 Move punch 分析步，INC=23 时应变云图

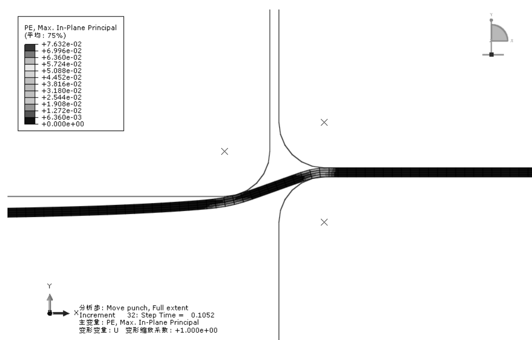


图 13-126 Move punch 分析步，INC=32 时应变云图

图 13-127 所示为 INC=60 时的应变云图。图 13-128 所示为 INC=66 时的应变云图。

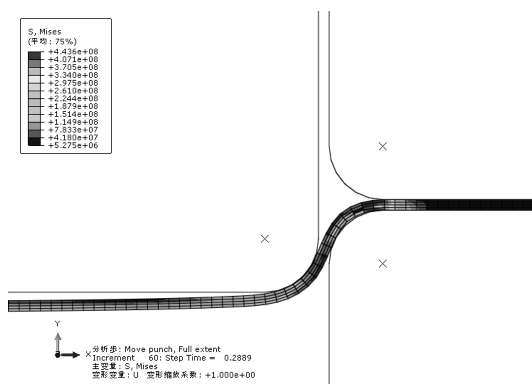


图 13-127 Move punch 分析步，INC=60 时应变云图

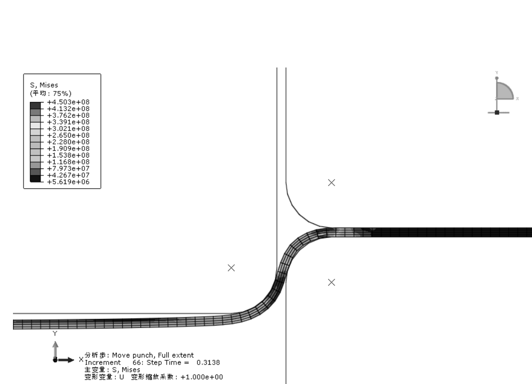


图 13-128 Move punch 分析步，INC=66 时应变云图

图 13-129 所示为 INC=97 时的应变云图，对称面位置未接触。图 13-130 所示为 INC=115 时的应变云图，此时形状基本成形。

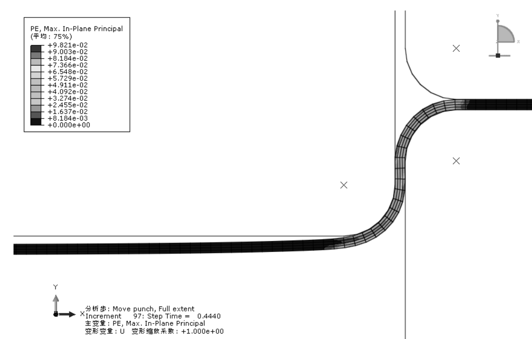


图 13-129 Move punch 分析步，INC=97

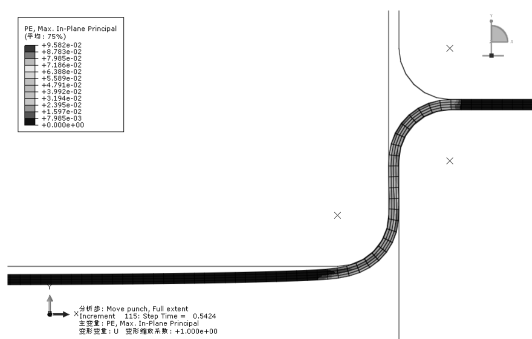


图 13-130 Move punch 分析步，INC=115

图 13-131 所示为 INC=180 时应变云图。图 13-132 所示为完成加工时的应变云图，

INC=215。

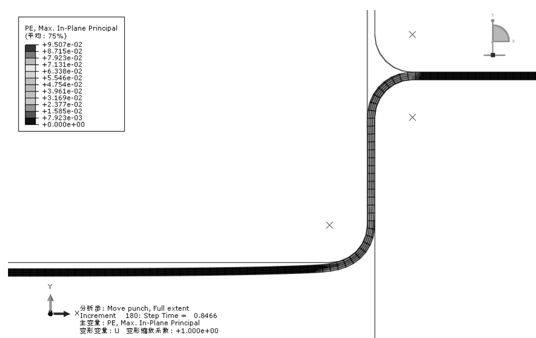


图 13-131　Move punch 分析步，INC=180

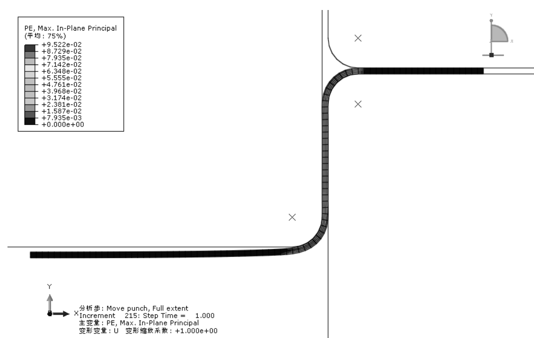


图 13-132　Move punch 分析步，INC=215

选择“视图→ODB 显示”选项，弹出图 13-133 所示的“ODB 显示选项”对话框，在“扫掠/拉伸”选项卡中勾选“拉伸单元”，输入“深度”为“0.05”，单击“确定”，完成拉伸如图 13-134 所示。

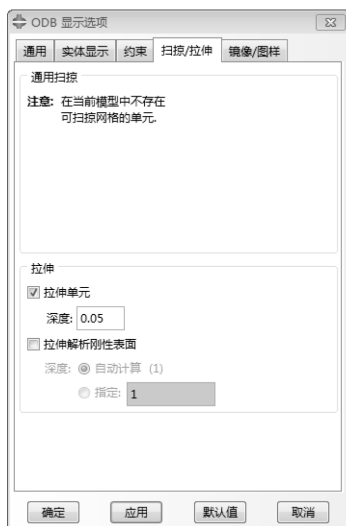


图 13-133　“ODB 显示选项”对话框

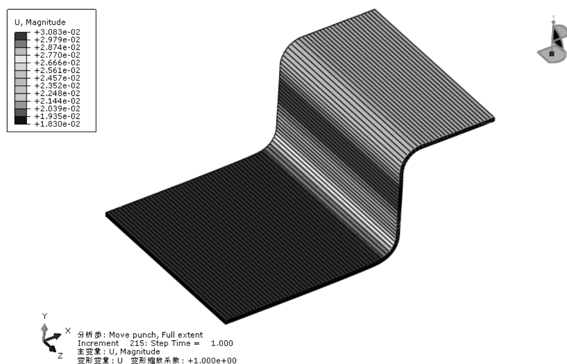


图 13-134　拉伸

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 时的应力云图如图 13-135 所示。Remove right Constraint 分析步的应力云图如图 13-136 所示。由图 13-135 与图 13-136 分布可见无显著区别，但数值上有变化。

Holder force 分析步的应力云图如图 13-137 所示，Establish contact II 分析步应力云图如图 13-138 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应力变化。

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应力云图如图 13-139 所示，材料开始发生明显的变形。INC=32 时，应力云图如图 13-140 所示，应力集中增大。

INC=60 时应力云图如图 13-141 所示，应力大且分布集中。INC=66 时应力云图如图 13-142 所示，高应力区域分离。

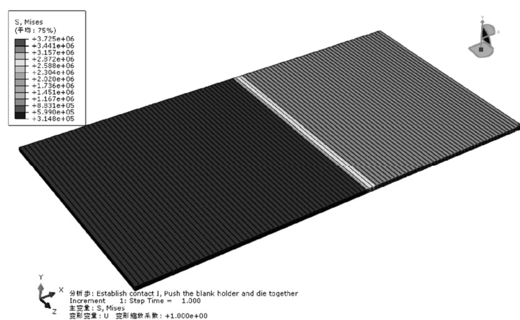


图 13-135 Establish contact I 分析步应力云图

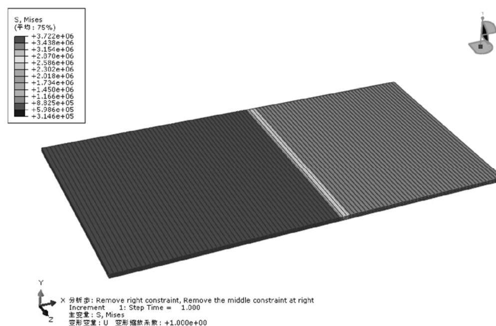


图 13-136 Remove right constraint 分析步应力云图

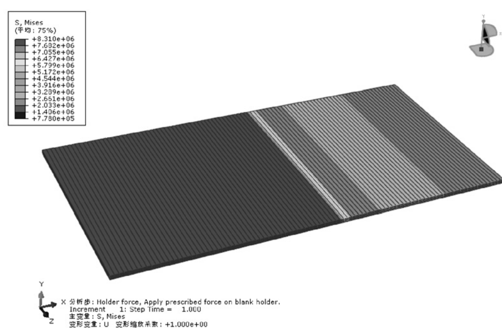


图 13-137 Holder force 分析步应力云图

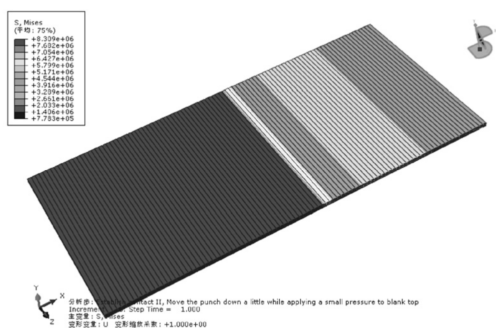


图 13-138 Establish contact II 分析步应力云图

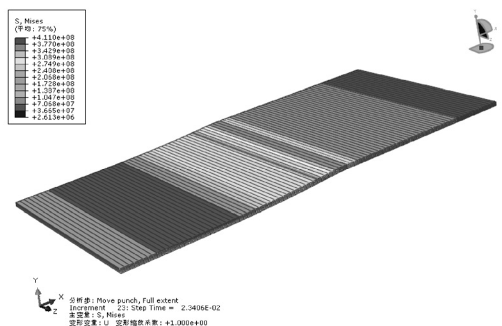


图 13-139 Move punch 分析步，INC=23 时应力云图

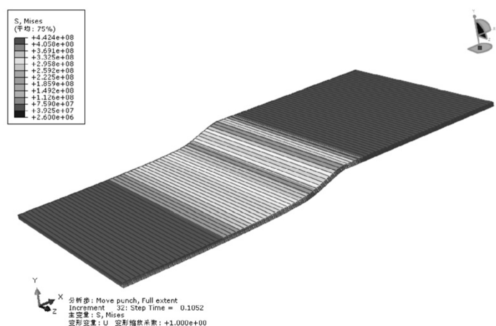


图 13-140 Move punch 分析步，INC=32 时应力云图

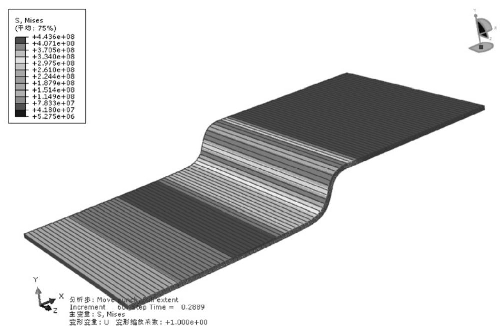


图 13-141 Move punch 分析步，INC=60 时应力云图

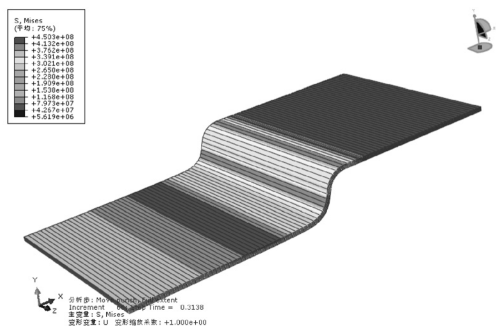
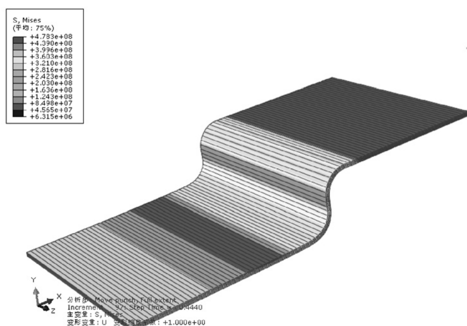


图 13-142 Move punch 分析步，INC=66 时应力云图

INC=97 时应力云图如图 13-143 所示，对称面位置未接触。INC=115 时应力云图如图 13-144 所示，形状基本成形。



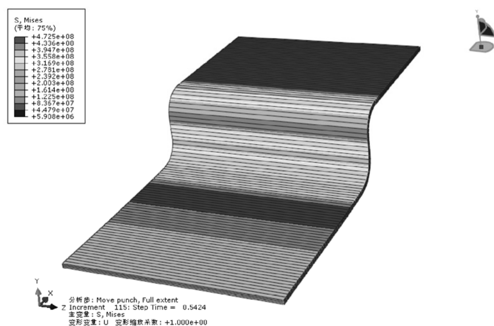
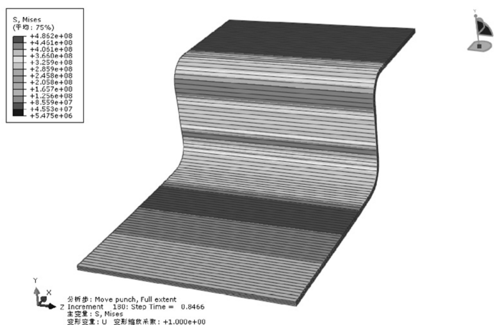


图 13-143　Move punch 分析步，INC=97 时应力云图　图 13-144　Move punch 分析步，INC=115 时应力云图

INC=180 时应力云图如图 13-145 所示。INC=215 时应力云图如图 13-146 所示，完成加工。



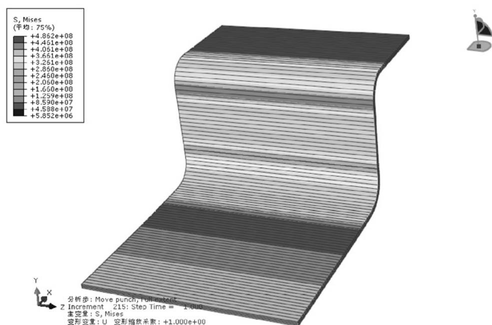
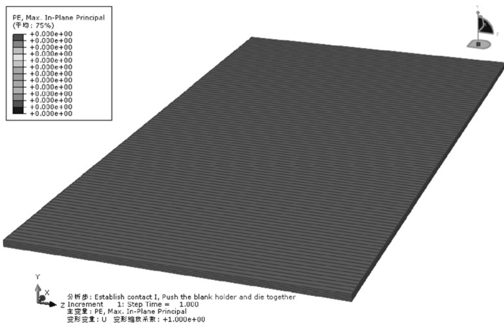


图 13-145　Move punch 分析步，INC=180 时应力云图　图 13-146　Move punch 分析步，INC=215 时应力云图

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 时的应变云图如图 13-147 所示。Remove right Constraint 分析步的应变云图如图 13-148 所示。由图 13-147 与图 13-148 分布可见无显著区别，此时还没有变形。



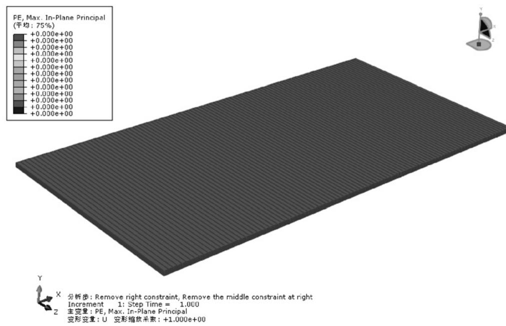


图 13-147　Establish contact I 分析步应变云图　　图 13-148　Remove right constraint 分析步应变云图

Holder force 分析步的应变云图如图 13-149 所示。Establish contact II 分析步应变云图如图 13-150 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应变变化。

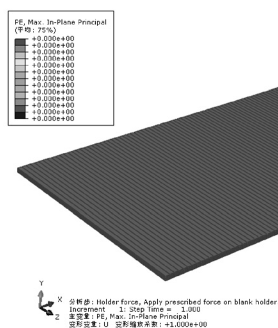


图 13-149　Holder force 分析步应变云图

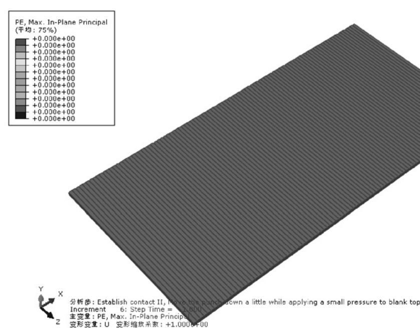


图 13-150　Establish contact II 分析步应变云图

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应变云图如图 13-151 所示，开始发生明显的变形。INC=32 时应变云图如图 13-152 所示，变形增大。

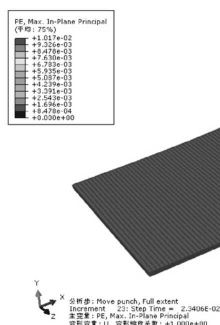


图 13-151　Move punch 分析步，INC=23 时应变云图

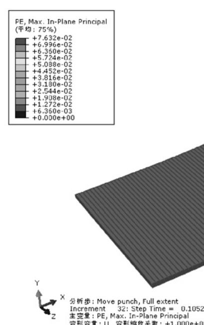


图 13-152　Move punch 分析步，INC=32 时应变云图

图 13-153 所示为 INC=60 时的应变云图。图 13-154 所示为 INC=66 时的应变云图。

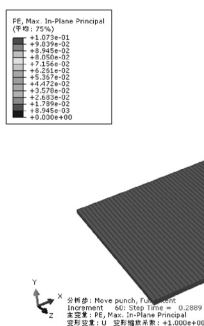


图 13-153　Move punch 分析步，INC=60 时应变云图

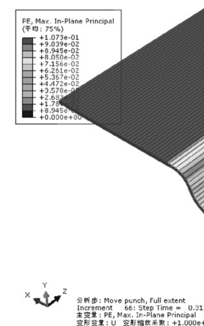


图 13-154　Move punch 分析步，INC=66 时应变云图

图 13-155 所示为 INC=97 时应变云图，此时对称面位置未接触。图 13-156 所示为 INC=115 时应变云图，此时形状基本成形。

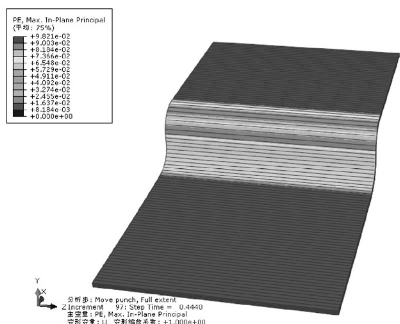


图 13-155 Move punch 分析步，INC=97 时应变云图

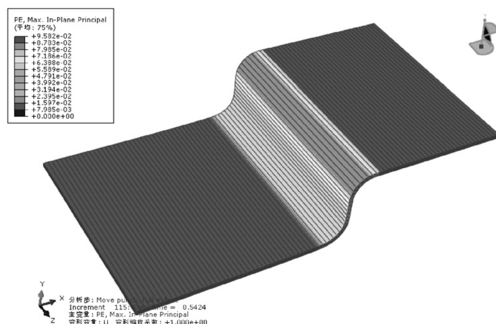


图 13-156 Move punch 分析步，INC=115 时应变云图

图 13-157 所示为 INC=180 时应变云图。图 13-158 所示为完成加工时的应变云图。

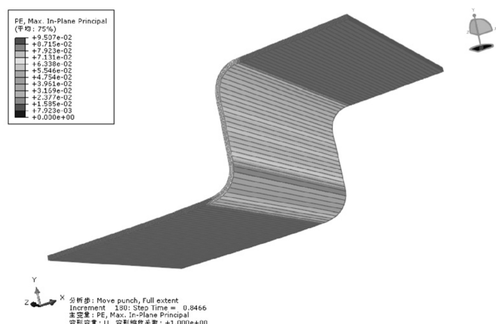


图 13-157 Move punch 分析步，INC=180 时应变云图

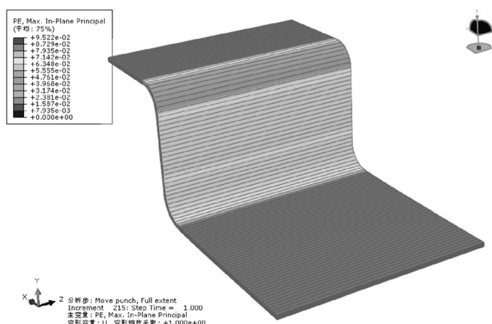


图 13-158 Move punch 分析步，INC=215 时应变云图

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 时的应力符号如图 13-159 所示。Remove right Constraint 分析步的应力符号如图 13-160 所示，由图 13-159 与图 13-160 分布可见无显著区别，但数值上有变化。

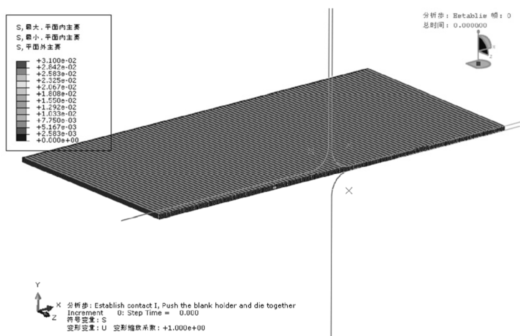


图 13-159 Establish contact I 分析步应力符号

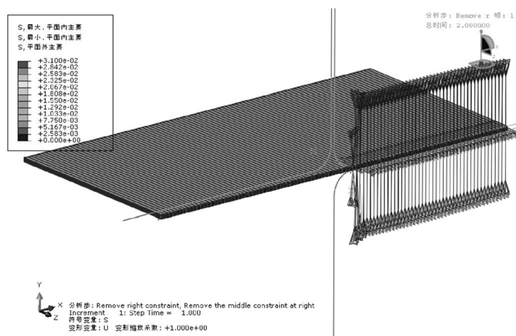


图 13-160 Remove right constraint 分析步应力符号

Holder force 分析步的应力符号图如图 13-161 所示。Establish contact II 分析步应力符号图如图 13-162 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应力变化。

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应力符号如图 13-163 所示，材料开始发生明显的变形。INC=32 时应力符号如图 13-164 所示，应力集中增大。

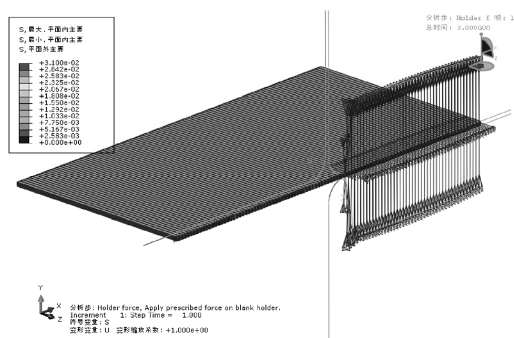


图 13-161 Holder force 分析步应力符号

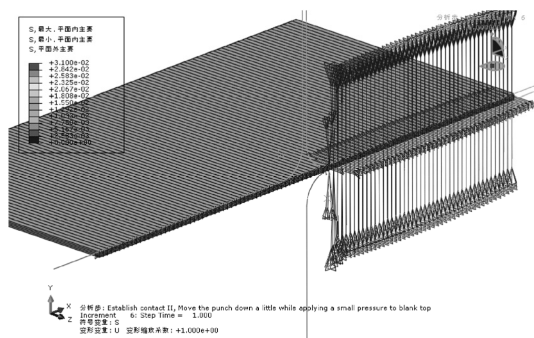


图 13-162 Establish contact II 分析步应力符号

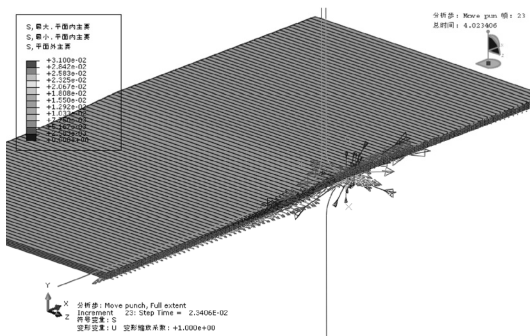


图 13-163 Move punch 分析步，INC=23 时应力符号

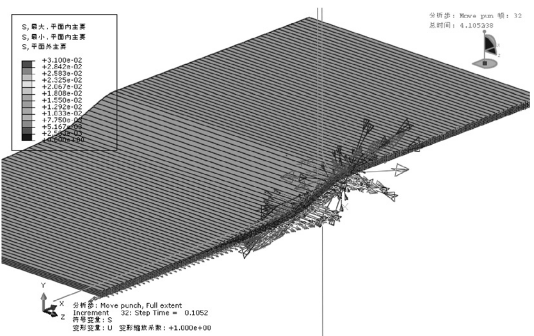


图 13-164 Move punch 分析步，INC=32 时应力符号

INC=60 时应力符号如图 13-165 所示，应力大且分布集中。INC=66 时应力符号如图 13-166 所示，高应力区域分离。

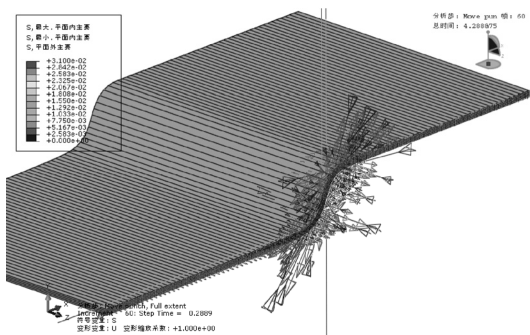


图 13-165 Move punch 分析步，INC=60 时应力符号

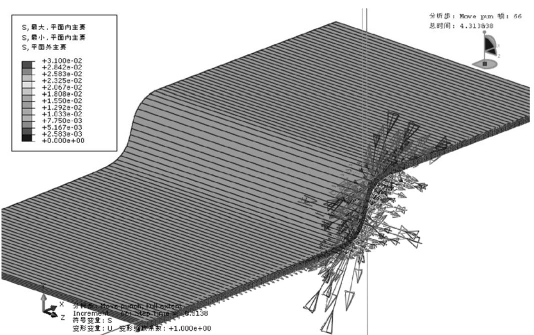


图 13-166 Move punch 分析步，INC=66 时应力符号

INC=97 时应力符号如图 13-167 所示，对称面位置未接触。INC=115 时应力符号如图 13-168 所示，形状基本成形。

图 13-169 所示为 INC=180 时应力符号。图 13-170 所示为完成加工时的应力符号。

使用工具可以显示分析步 Establish contact I 时的应变符号如图 13-171 所示。Remove right Constraint 分析步的应变符号如图 13-172 所示。由图 13-171 与图 13-172 分布可见无显著区别，此时还没有变形。

Holder force 分析步的应变符号如图 13-173 所示。Establish contact II 分析步应变符号图如图 13-174 所示，注意冲头位置变化及接触位置的应变变化。

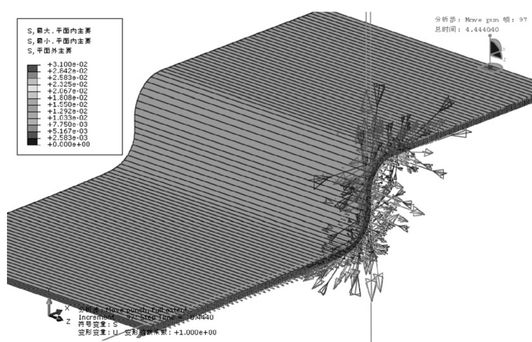


图 13-167　Move punch 分析步，INC=97 时应力符号

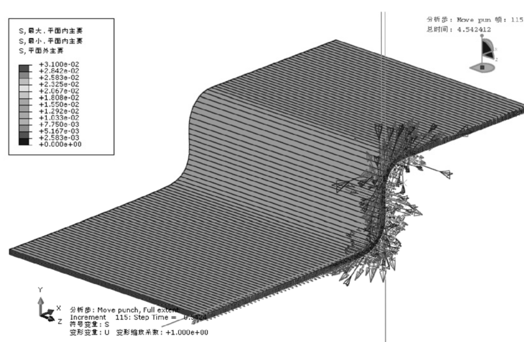


图 13-168　Move punch 分析步，INC=115 时应力符号

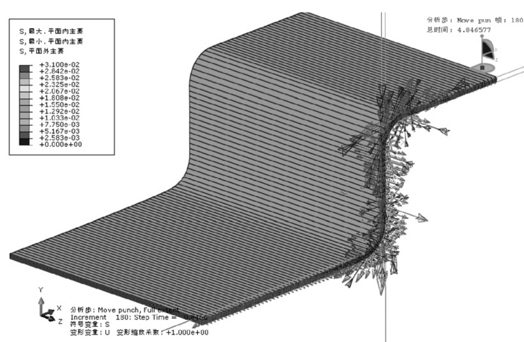


图 13-169　Move punch 分析步，INC=180 时应力符号

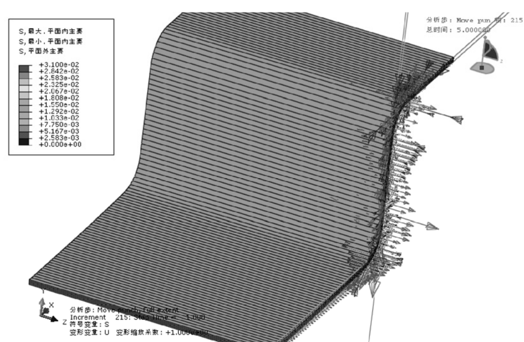


图 13-170　Move punch 分析步，INC=215 时应力符号

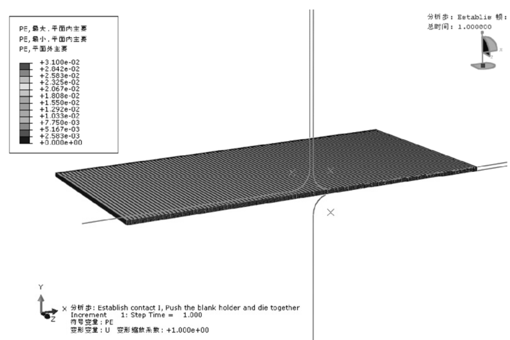


图 13-171　Establish contact I 分析步应变符号

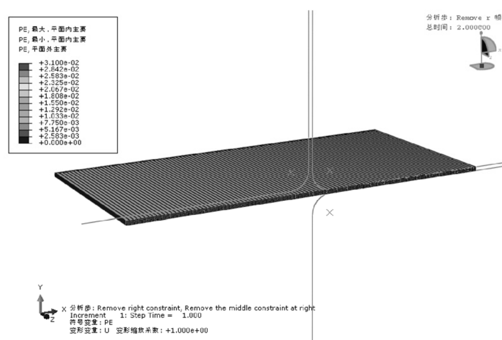


图 13-172　Remove right constraint 分析步应变符号

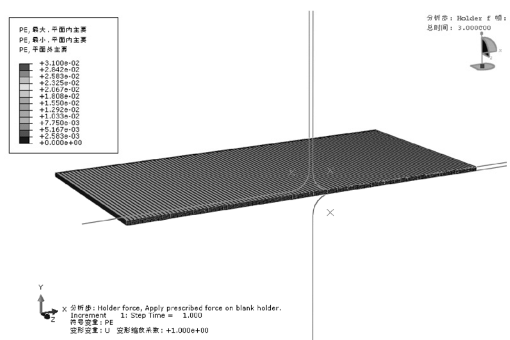


图 13-173　Holder force 分析步应变符号

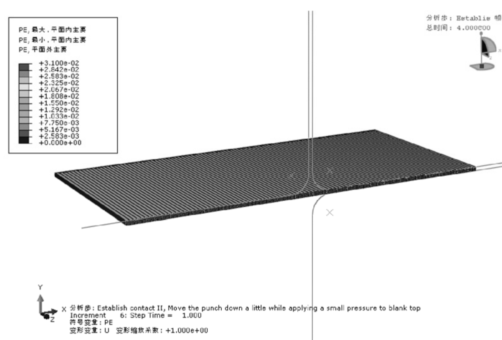


图 13-174　Establish contact II 分析步应变符号

进入 Move punch 分析步，INC=23 时应变符号如图 13-175 所示，开始发生明显的变形。INC=32 时应变符号如图 13-176 所示，变形增大。

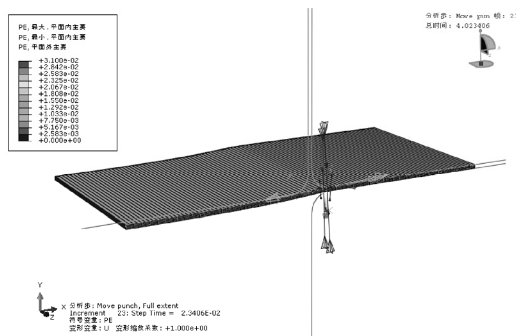


图 13-175　Move punch 分析步，INC=23 时应变符号

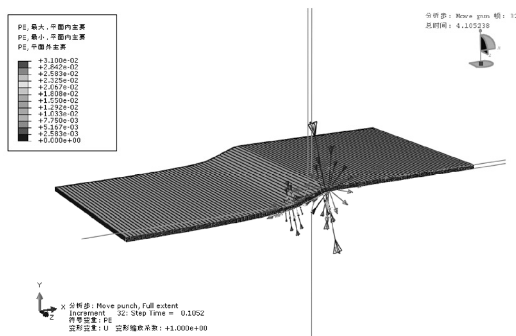


图 13-176　Move punch 分析步，INC=32 时应变符号

图 13-177 所示为 INC=60 时的应变符号。图 13-178 所示为 INC=66 时的应变符号图。

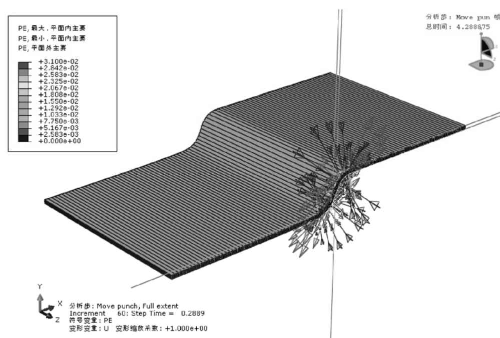


图 13-177　Move punch 分析步，INC=60 时应变符号

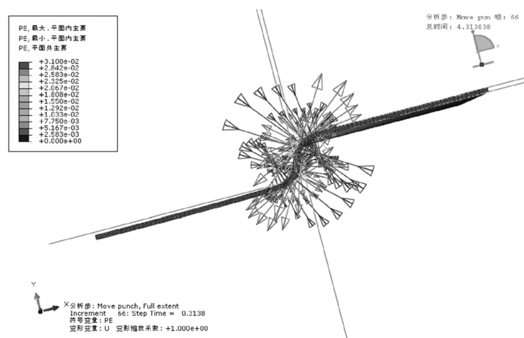


图 13-178　Move punch 分析步，INC=66 时应变符号

图 13-179 所示为 INC=97 时应变符号图，对称面位置未接触。图 13-180 所示为 INC=115 时应变符号图，形状基本成形。

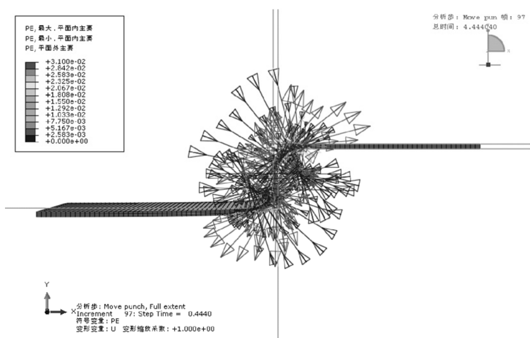


图 13-179　Move punch 分析步，INC=97 时应变符号

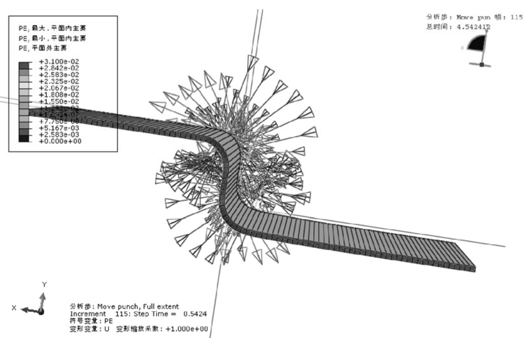
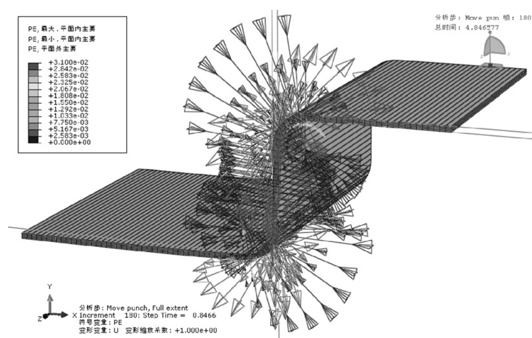


图 13-180　Move punch 分析步，INC=115 时应变符号

图 13-181 所示为 INC=180 时应变符号。图 13-182 所示为完成加工时的应变符号。



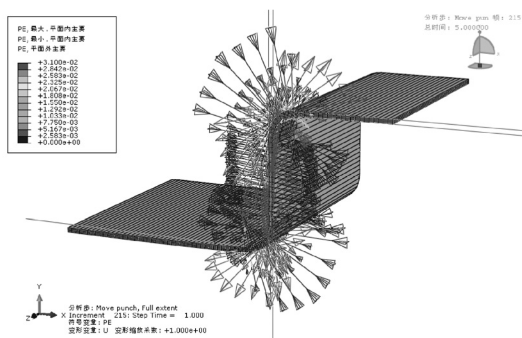


图 13-181　Move punch 分析步，INC=180 时应变符号　图 13-182　Move punch 分析步，INC=215 时应变符号

13.3　本章小结

接触分析需要一个谨慎而有逻辑的方法。如果必要，需要将分析过程分解成几步执行，并缓慢地施加载荷，以保证很好地建立接触条件。

一般而言，对分析的每一部分最好采用不同分析步，即便仅仅是为了改变边界条件而施加载荷。当然这样做，所使用的分析步数要比预期的多，但模型的收敛更容易。如果想一步就将所有的载荷加上，接触分析通常难以完成。

在对结构施加工作载荷之前，要求所有部件之间达到稳定的接触状态。如果有必要，可使用临时边界条件，在随后的阶段中可以撤除临时边界条件。只要所提供的约束不产生永久的变形，就不会对最终的结果产生影响。

不要对接触面上的结点施加边界条件，因为这样会导致这些点在接触方向受限制。如果有摩擦，不要对接触面上结点的任何自由度方向加约束，否则可能导致零主元信息。

对于接触模拟，要尝试使用一阶单元。



第 14 章　显式动态分析

本章将简要介绍动态问题的产生、动态分析的主要方法及隐式与显式各自的特点和适合求解的领域通过具体的显式动态工程分析案例，让读者能够快速掌握运用 ABAQUS/Explicit 分析模块来分析求解实际项目中的工程问题。

本章学习目标

- 掌握显式动态分析的概念
- 掌握显式动态分析的理论方法
- 掌握隐式方法与显式方法的特点
- 掌握显式算法进行分析的方法

14.1　显式动态分析简介

本节主要从动态问题的产生及其形式、动态问题分析的主要方法以及 ABAQUS 显隐式求解算法的对比三个方面来叙述动态问题。

14.1.1　显式动态问题的产生及其形式

ABAQUS 软件中的显式动态求解方法是应工程实际需要而产生的，它是一种真正的动态求解过程。它的最初发展是为了模拟高速冲击问题，在这类问题中惯性发挥了主导性的作用。在工程实际中，当惯性力非常大且随时间变化较快时，问题将变成动力学问题。

动力学问题在实际中有着广泛的应用领域，其形式包括振动、冲击又离心力等，最常遇到的动力学问题可以归为以下两类：

（1）承受周期性载荷或随机载荷。

所谓承受周期性载荷是指周期性的机械力载荷对设备或者结构所产生的影响。这类设备或结构例如高速旋转的电动机、往复运动的发动机等，它们承受着本身惯性及周围介质或结构的相互作用。这类问题的主要参数有振幅和频率等。

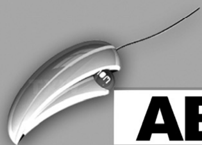
所谓承受随机载荷是指无规则运动的机械力载荷对设备或者结构所产生的影响。随机载荷在数学分析上不能用确切的函数表示，只能用概率和统计的方法来描述其规律。随机载荷主要是由外力的随机性引起的，例如强风、海浪及地震等。

（2）承受非周期性载荷。

所谓承受非周期性载荷是指非周期性的机械力载荷对设备或者结构的影响，其特点是作用时间短暂，但加速度很大，其一般会涉及波在介质中的传播问题。

在实际中典型的体现就是碰撞和冲击，例如汽车碰撞、飞机的降落、船舶的抛锚以及爆炸等。这类问题的主要参数有波形、加速度、碰撞或冲击的持续时间等。

无论是哪类动力学问题都对设备或者结构的可靠性造成危害，例如，承受周期性载荷的



设备或结构在某一激振频率下产生共振，可能引起振动加速度超过设备或结构的极限而遭受破坏；或者在碰撞或者冲击的瞬时，作用于设备或结构上的惯性载荷及由此引起的个别部件中产生的应力，可能超过设备或结构的允许值而造成破坏；也可能由于多次冲击作用形成设备或结构的疲劳积累，使设备或者结构损坏或者强度极限降低。因此可以说动态问题的产生和形式是多种多样的，其对设备或结构造成损害也是复杂多样且比较严重的。

14.1.2 显式动态分析的主要方法

ABAQUS 中的显式动态分析包括两类基本方法，即振型叠加法和直接解法，分别用来求解线性动态问题和非线性动态问题。

ABAQUS/Standard 分析模块可以采用振型叠加和直接解法两种方法来求解实际中的动态问题；而 ABAQUS/Explicit 分析模块只能采用直接解法来求解工程实际中的动态问题，因为其算法是采用显式直接积分来求解非线性动态问题的。

ABAQUS 将它的所有分析过程主要划分为两类，即线性摄动分析（Linear perturbation）和通用分析（General），如图 14-1 与图 14-2 所示。通用分析步可以应用于 ABAQUS/Standard 或 ABAQUS/Explicit 分析中，而线性摄动分析只能应用于 ABAQUS/Standard 分析中。

在某个具体案例的分析过程中，如果采用通用分析步（General step），模型的响应可能是线性的或者非线性的；如果采用线性摄动分析步（perturbation step），其模型的响应只能是线性的。



图 14-1 线性摄动分析步



图 14-2 通用分析步

以下简要叙述动态问题的两种主要解法。

直接解法简而言之就是直接对运动方程进行积分，通常采用两种算法。一种是中心差分法，其对应的是显式算法；另外一种是 Newmark 方法，其对应的是隐式算法。

利用振型叠加法求解动态响应问题的运动方程由两部分组成：求解系统的固有频率和固有振型；求解系统的动力学响应。在利用振型叠加法求解动态响应问题时，求解运动方程的两个组成部分是有先后顺序的，即先求解系统的固有频率和固有振型，之后才能求解系统的

动力学响应。

每种方法都有各自的特点，对于实际的具体工程问题需要具体分析才能决定选用哪种方法求解。

14.1.3 隐式和显式的比较

ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit 两个分析模块都具有解决各种类型问题的能力，对于一个确定的实际工程问题，采用哪个分析模块需要综合考虑各种因素。对于采用任何算法都可以求解的问题，求解效率可能起着决定性的作用。下面对隐式和显式的优缺点作一下比较。

1．ABAQUS 隐式求解（ABAQUS/Standard）

采用 Newmark 隐式时间积分：

$$M_{ij}\ddot{u}_j(t)+C_{ij}\dot{u}_j(t)+K_{ij}u_j(t)=P_i(t) \tag{14-1}$$

- 对于线性问题无条件稳定，容易收敛。（公式不作展开，相关知识可以参阅相关书籍，例如王勖成的《有限单元法》一书）
- 能够分析各种复杂的接触问题，但是经常受到限制。
- 可以采用大的时间步，时间步取决于模型结构的最高频率；没有时间增量步的限制，完成指定分析一般需要较少的时间增量。
- 因为每个增量步都需要求解线性方程组，计算成本非常大，可能会占用大量的磁盘空间和内存。
- 适合静力问题、低频动力学问题及特征值分析。

2．ABAQUS 显式算法（ABAQUS/Explicit）

采用中心差分法进行显式时间积分：

$$M_{ij}\ddot{u}_j(t+\Delta t)+C_{ij}\dot{u}_j(t+\Delta t)+K_{ij}u_j(t+\Delta t)=P_i(t+\Delta t) \tag{14-2}$$

- 方程非耦合，可以直接求解，容易发散，需要复杂算法选择来控制。（公式不作展开，相关知识可以参阅相关书籍，例如王勖成的《有限单元法》一书）
- 能够分析各种复杂的接触问题，算法优越，能实现实际接触中力的传递。
- 需要非常小的时间步以保持求解稳定，时间步取决于单元尺寸和波速；有稳定时间增量的限制，完成指定分析一般需要较多的时间增量。
- 不需要求解线性方程组，所以每个增量步的计算成本较低，所需的磁盘空间和内存相对于隐式求解较小。
- 适合求解冲击、穿透等高频非线性动力响应问题。

3．适用的求解范围

（1）ABAQUS 隐式求解

- 适合于模拟与振型的振动频率相比响应周期较长的问题。由于时间增量的限制，使用显式求解效率很低。
- 用于具有适度非线性问题，其中非线性是平滑的。如果是平滑的非线性响应，隐式求解只需要较少次数的迭代就可以收敛。

（2）ABAQUS 显式求解

- 适合于模拟高速动力学问题。由于需要较少的时间增量，使用隐式求解效率较低。
- 对于包含不连续的非线性问题，一般效率更高。例如：接触和碰撞行为，隐式求解可能需要较大的计算成本，而且求解容易产生问题。
- 其他不连续行为包括屈曲和材料失效等问题。

14.2 显式动态分析实例

高速动力学问题和复杂的接触问题是 ABAQUS/Explicit 显式动态分析最主要的应用，本章的两个实例就是选自这两类问题的典型代表。

第一个显式动态分析案例是手机跌落过程中电池盖的失效分析，主要是熟悉并掌握在 ABAQUS 软件中各种电子产品（包括各种电子消费品、通信设备及医疗设备等）跌落模拟仿真分析的操作流程，其关注的要点在于复杂接触问题的主要分析方法。

第二个显式动态分析案例是弹丸侵蚀靶体分析，主要是掌握并练习在 ABAQUS 软件中高速冲击问题的分析方法和分析流程，其关注的要点在于材料失效模型的选择以及单元失效的后处理问题。

14.2.1 ABAQUS/Explicit 实例——手机跌落测试

3C 产品在运输、装卸及使用过程中，结构可能发生破坏。有近 80%的电子产品损坏来自于高速撞击，研发人员往往耗费大量的时间与成本针对产品做相关的品质验证，最常见的结构试验就是跌落和冲击试验。

这个案例取材于通信产品手机实际测试中的跌落分析方案，其主要目标在于检验手机跌落过程中手机电池盖的设计是否满足强度要求，即手机电池盖上的卡扣是否能保证在手机完成跌落测试后手机电池盖或者电池不脱落。

在实际测试标准中手机跌落后，即使手机电池盖或者手机电池发生了脱落，如果重新安装后并不影响手机持有者的使用，其设计也算符合要求。

出于计算资源和时间成本的考量，本实例仅引入手机模型的三个零件进行本例的模拟仿真分析，分别是手机后壳体、手机电池以及手机电池盖，其装配模型如图 14-3 及图 14-4 所示，而没有将手机整体模型（包括手机前后壳体、LCD 模组、PCB 模组、手机电池以及手机键盘等）的重量加到此分析模型上。

本例的几何模型是比较复杂的，尤其是几何装配模型中的手机后壳体零件包含复杂的曲面以及细小的特征，为方便计算对几何装配模型中的手机后壳体零件进行了大量简化，并在分析中将手机后壳体约束成刚体，原因主要有以下四个方面：

- 将手机后壳体约束成刚体是出于计算资源和时间成本的考量；
- 将手机后壳体约束成刚体并不影响该案例分析的目的；
- 将手机后壳体约束成刚体，可以避免手机模型和刚性墙撞击过程中手机后壳体变成悬臂梁结构；
- 将手机后壳体约束成刚体将使跌落条件更加严格。

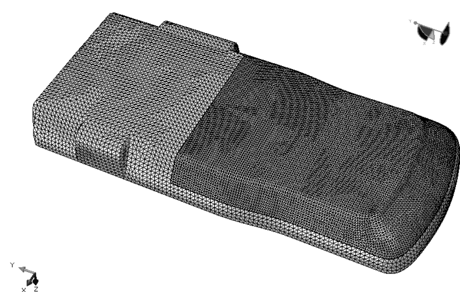


图 14-3 模型装配示意图（外部）

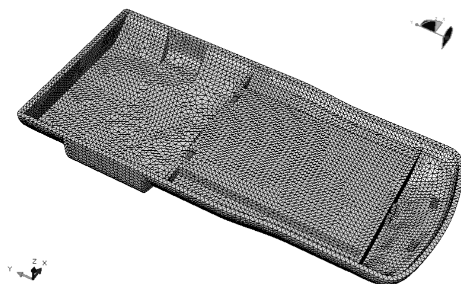


图 14-4 模型装配示意图（内部）

由于本例的分析目标是检验手机跌落过程中手机电池盖的设计强度是否符合要求，对几何装配模型中的手机电池盖零件没有进行任何简化，其手机电池盖几何模型上的卡扣设计如图 14-5 所示。考虑到手机电池盖几何模型的复杂性以及划分网格的时间成本，因此对手机电池盖的网格划分采用修正二阶四面体单元（C3DM10），以提高模拟计算精度，其分析模型中各个部件之间的接触采用通用接触算法定义。

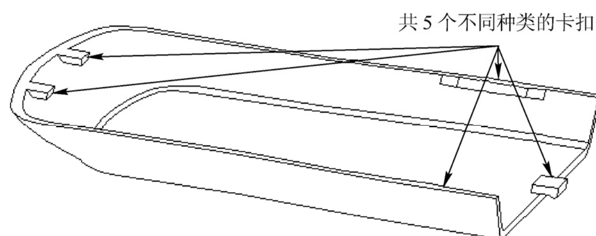


图 14-5 电池盖上卡扣设计参考图

本例的跌落条件说明如下：

- 0.8m 跌落高度，跌落到硬质地板上；
- 0.0004s 的跌落模拟时间；
- 整个模型没有质量缩放。

由于本例的几何模型比较复杂，采用 ABAQUS/CAE 进行网格划分需要消耗分析者较多的时间，故分析的网格模型采用 HyperMesh 软件建立，之后将模型导入到 ABAQUS 软件中进行分析模型的建立。

分析模型量纲系统采用 SI 标准，即长度：m，质量：kg，时间：s，其他量纲由此可以推出。整体模型的属性详见表 14-1 有限元整体模型属性表，分析模型各部件尺寸详见表 14-2 分析模型各部件局部尺寸（其尺寸为装配模型中全局坐标系下测量的尺寸，单位为 mm）。

表 14-1 有限元整体模型属性表

部 件	材 料	$\rho/(kg/m^3)$	E/Pa	σ_y/MPa	ν
手机后壳体	PC-ABS	1.14×10^3	2.6×10^9	80.00	0.38
手机电池盖					
手机电池	ALLOY	2.8×10^3	2.07×10^{11}		0.30
刚性墙	离散刚体				

表 14-2　分析模型各部件局部尺寸　单位：mm

部　件	沿 1 方向尺寸	沿 2 方向尺寸	沿 3 方向尺寸
手机后壳体	47.98	103.7	9.85
手机电池	30.0	47.14	5.2
手机电池盖	45.36	62.54	6.0
刚性墙	100.0		100.0

（1）首先建立模型。

通过导入 HyperMesh 软件生成的 INP 文件来创建网格部件，在主菜单中执行“文件（File）→导入（Import）→模型（Model）”命令。

选择下载包中的 mobile_parts_model.inp 文件，可以看到在模型树中显示出两个模型，分别为原有的模型 Model-1 和导入的模型 Cellphone，选择模型 Model-1 并单击，按键盘上的〈Delete〉键，删除此模型。

这时模型树上只显示模型 Cellphone 如图 14-6 所示。图 14-7 所示为机体模型，如图 14-8 所示为电池模型，图 14-9 所示为后盖模型。

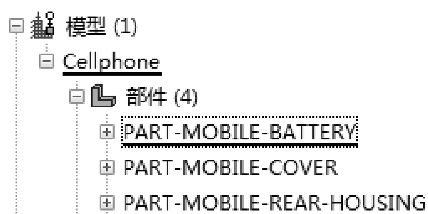


图 14-6　模型树

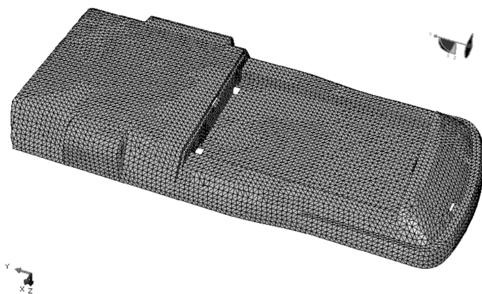


图 14-7　机体模型

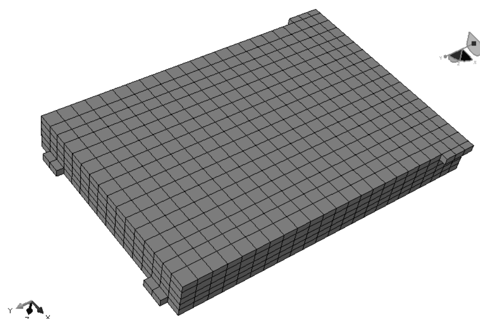


图 14-8　电池

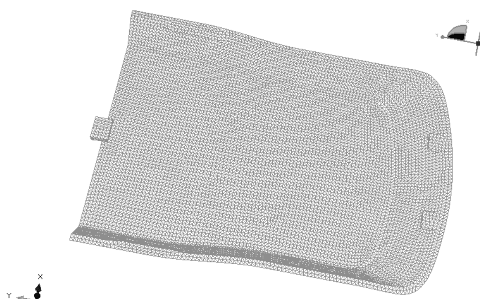


图 14-9　后盖

（2）单击部件模块中的，弹出图 14-10 所示的“创建部件”对话框，选择离散刚性的二维平面模型，“大约尺寸”为“0.3”，进入草图，绘制一个边长为 0.1×0.1 的矩形，单击中键完成，如图 14-11 所示。



图 14-10 “创建部件”对话框

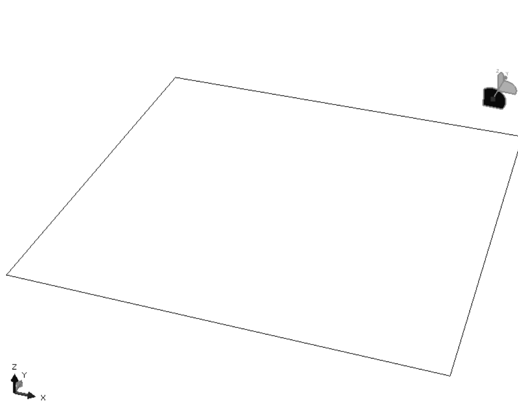


图 14-11 刚体平面

也可以在命令中直接生成刚体平面。

```
**
*Part, name=Part-rigid-plane
*Node
      1, 0.0500000007, 0.0500000007,           0.
```

定义完结点后，连接使其成为单元。

```
*Element, type=R3D4
 1,    1,    2,   23,   22
```

（3）定义好部件后，开始创建材料。进入“属性”模块，单击，弹出图 14-12 所示的“编辑材料”对话框，添加通用属性中的密度、线弹性参数及塑性材料参数。其中，密度参数按图 14-13 设置。弹性材料参数按图 14-14 设置，塑性材料参数按图 14-15 设置，只定义屈服应力。

在命令中定义 PC-ABS 材料的参数十分方便。

```
** MATERIALS
**
*Material, name=Material-pc-abs
*Density
1140.,
*Elastic
 2.6e+09, 0.38
*Plastic
 8e+07,0.
```

再次单击，定义 ALLOY 材料，密度参数按图 14-16 设置，弹性材料参数按图 14-17 设置。



图 14-12 “编辑材料”对话框



图 14-13 密度数据（PC-ABS）

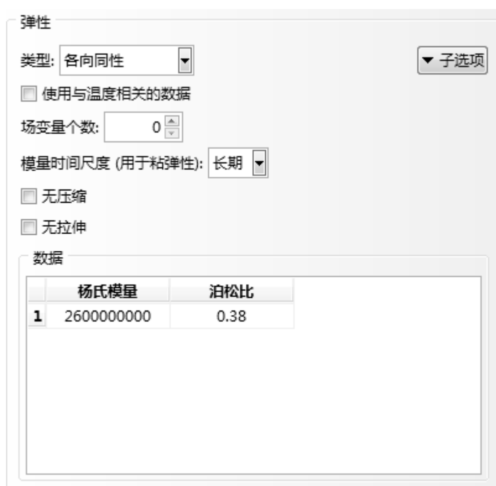


图 14-14 弹性参数（PC-ABS）



图 14-15 塑性参数（PC-ABS）

类似地，也可以用命令定义 ALLOY 材料。

```
**
** MATERIALS
**
*Material, name=Material-alloy
*Density
2800.,
*Elastic
```

2.07e+11, 0.3



图 14-16 密度参数（ALLOY）



图 14-17 弹性参数（ALLOY）

（4）接下来创建相应的截面。

在“属性”模块单击，弹出图 14-18 所示的“创建截面”对话框，输入截面名称，选择均质实体截面，单击“继续”，在图 14-19 所示的“编辑截面”对话框中选择“MATERIAL-PC-ABS”材料，单击“确定”。



图 14-18 创建截面

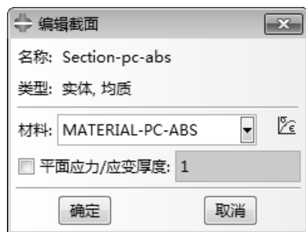


图 14-19 编辑截面

重复上述操作，为 ALLOY 材料定义均质实体截面。

单击按钮，将 PC-ABS 材料的截面指派给 rear-housing 部件与 cover 部件，把 ALLOY 材料的截面指派给 battery 部件。

选择 rigid-plane 部件，然后在菜单栏选择“工具→参考点”命令，在刚性墙的正中创建一个参考点，如图 14-20 所示。

执行“特殊设置（Special）→惯性（Inertia）→创建（Create）”命令，弹出“创建惯量”（Create Inertia）对话框，名称默认为“Inertia-1”，类型选择“点质量/惯性”（Point mass/inertia），单击“继续”（Continue）按钮。

也可以使用如下命令进行定义。

*Element, type=MASS, elset=_PickedSet7_Inertia-1_
401, 442
*Mass, elset=_PickedSet7_Inertia-1_
1e-05,

根据信息提示区选择区域类型（Select points to assign point mass/inertia），选择参考点RP，单击鼠标中键，弹出如图 14-21 所示的对话框，输入质量为“1E-005”，单击“确定”按钮，完成部件 Part-rigid-plane 截面属性的定义。

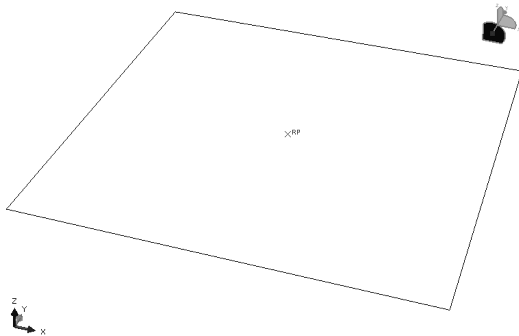


图 14-20　参考点位置

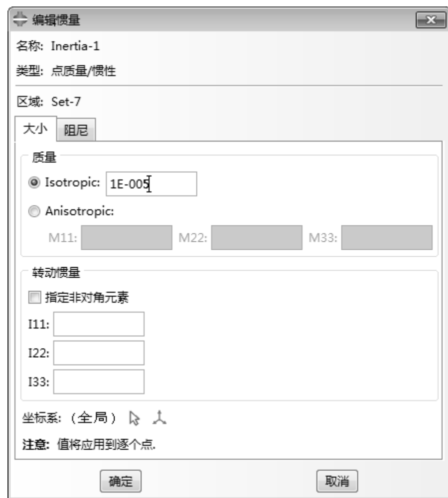


图 14-21　“编辑惯量”对话框

（5）完成截面的定义，即开始对网格进行定义。由于部件主要来自 Hypermesh，故只需要对刚性墙划分离散刚体单元。

在“网格”模块中单击，弹出图 14-22 所示的“全局种子”对话框，输入“近似全局尺寸”为“0.005”，单击“确定”。然后单击，弹出图 14-23 所示的“网格控制属性”对话框，“单元形状”选择“四边形”，单击“确定”。



图 14-22　“全局种子”对话框



图 14-23　“网格控制属性”对话框

由于在刚性墙创建时已将其定义为离散刚体，所以无需定义单元类型，默认即是

R3D4，直接单击按钮，完成划分。完成划分的部件如图 14-24 所示。

其他部件均为网格形态导入，不用再划分网格。

（6）已完成每个部件的设置，现在进行装配。

在“装配”模块中单击，弹出图 14-25 所示的“创建实例”对话框，将机体、电池和后盖实例化，这三个部件已按安装位置定位好，不需要调整。

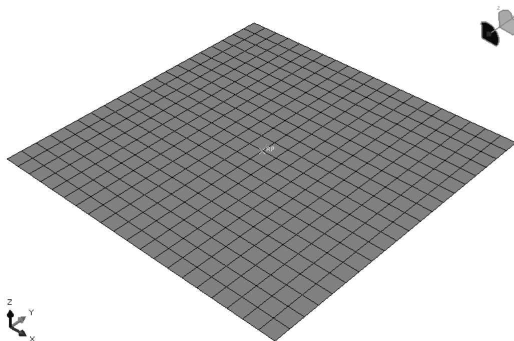


图 14-24 刚性墙的网格



图 14-25 “创建实例”对话框

重复上述操作，再将刚性墙实例化，调整位置，使平面参考点的在 Y 方向上距离机体最底部 0.01mm，如图 14-27 所示。



图 14-26 机体、电池和后盖实例化

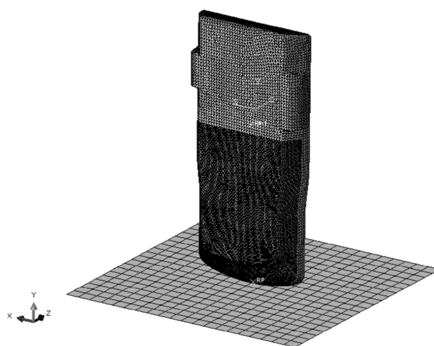


图 14-27 刚性墙实例化

使用命令可以精确地直接将实例放置在目标位置。

```
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=PART-mobile-battery-1, part=PART-mobile-battery
*End Instance
**
*Instance, name=Part-rigid-plane-1, part=Part-rigid-plane
          0.,        -0.067995,          0.
          0.,        -0.067995,          0.,          1.,     -0.067995,          0.,          90.
```

```
*End Instance
**
*Instance, name=PART-mobile-cover-1, part=PART-mobile-cover
*End Instance
**
*Instance, name=PART-mobile-rear-housing-1, part=PART-mobile-rear-housing
*End Instance
**
```

（7）下面开始定义接触。

首先要定义一个摩擦系数为 0.3、法向为硬接触的接触属性。

进入“相互作用”模块。单击，弹出图 14-28 所示的“创建相互作用属性”对话框，选择“接触”，单击“继续”，弹出图 14-29 所示的“编辑接触属性”对话框。



图 14-28 “创建相互作用属性”对话框



图 14-29 “编辑接触属性”对话框

在“编辑接触属性”对话框中的“力学”选项下，选择“切向行为”，按图 14-30 定义摩擦系数，然后选择“法向行为”，按图 14-31 定义“硬接触”。



图 14-30 切向行为设置



图 14-31 法向行为设置

以上操作只用几行代码即可完成。

```
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=IntProp-friction03
*Friction
```

0.3,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
**

完成属性定义后，单击，弹出图 14-32 所示的“创建相互作用”对话框，选择“通用接触（Explicit）”，单击“继续”，弹出图 14-33 所示的“编辑相互作用”对话框，按图 14-33 进行设置。



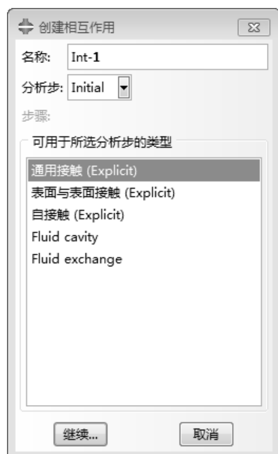


图 14-32 “创建相互作用”对话框



图 14-33 “编辑相互作用”对话框

完成相互作用编辑的模型如图 14-34 所示。

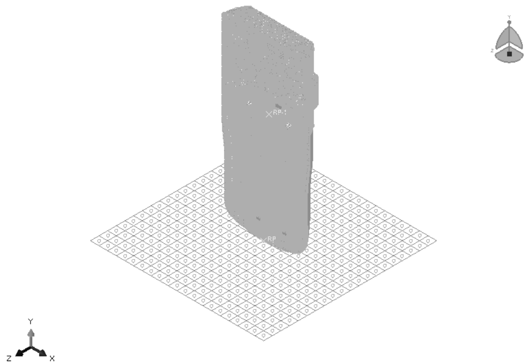
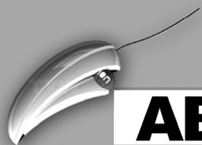


图 14-34 完成接触定义

相互作用的命令依然简洁。

**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-general-contact




```
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
 ,  , IntProp-friction03
**
```

（8）接下来进行刚体约束的设置。首先要定义参考点。

执行“工具（Tools）→参考点（Reference Point）”命令，在图形窗口选择实例 PART-MOBILE-REAR-HOUSING 的中间部位中心位置，即如图 14−35 所示的 RP-1 参考点的位置，创建一个参考点 RP-1。执行“约束（Constraint）→创建（Create）”命令，或单击按钮，弹出“创建约束”对话框。

输入名称为“Constraint-rigid-body”，选择“类型”为“刚体”，单击“继续”按钮，弹出“编辑约束”对话框，如图 14−36 所示。

“区域类型”中选择“体（单元）”，单击右部的（编辑）按钮，在图形窗口中选择实例 PART-MOBILE-REAR-HOUSING 的全部单元。



图 14−35　参考点位置



图 14−36 “编辑约束”对话框

单击提示区中的“完成”按钮，返回对话框，单击“参考点”栏中 Point 后面的“编辑”（Edit）按钮，在图形窗口选择参考点 RP-1。

选择的实例 PART-MOBILE-REAR-HOUSING 和参考点 RP-1。返回“编辑约束”对话框，单击“完成”按钮，把实例 PART-MOBILE-REAR-HOUSING 约束成刚体。

在 ABAQUS 中，一个实例如果被定义为刚体，无论这个实例由多少个单元以及结点组成，这个刚体只有 6 个自由度，而且它的单元尺寸的大小不会影响计算资源的利用。

在手机跌落模拟仿真中一些部件是在壳体内部，例如手机电池，碰撞过程中它们产生的变形非常微小而且不是模拟的重点对象，但是它们对其他部件产生的影响不能忽略，这样的部件就可以定义为刚体。可使用下述命令约束成刚体。

```
*Rigid Body, ref node=Part-rigid-plane-1.Part-rigid-plane-RefPt_, elset=Part-rigid-plane-1.Part-rigid-plane
** Constraint: Constraint-rigid-body
*Rigid Body, ref node=_PickedSet49, elset=_PickedSet50
```

由于本例引入手机模型的特殊性，这里将手机后壳体约束成刚体。

（9）接下来定义分析步。

从“模块”列表中选择“分析步”，进入“分析步”模块，单击工具箱中的“创建分析步”，弹出“创建分析步”对话框。

输入分析步名称为“Step-drop-test”，选择分析步类型为“通用、显式”，单击“继续”按钮，进入图 14-37 所示的“编辑分析步”对话框。

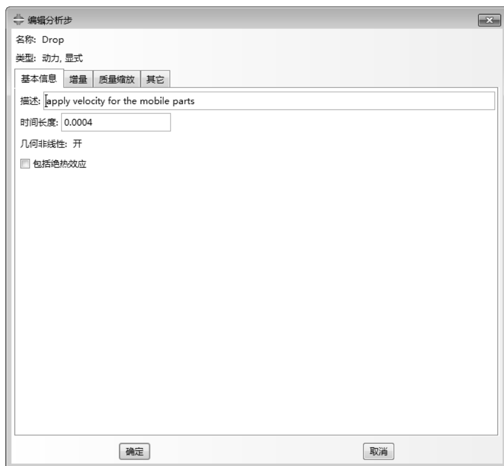


图 14-37 “编辑分析步”对话框

输入分析步“描述”为“apply velocity for the mobile parts”，分析“步时间长度”为“0.0004”，单击“确定”按钮，完成一个动态显式分析步的定义，其中“几何非线性”选项默认为“开”。也可以使用如下命令创建。

```
**
** STEP: Step-drop-test
**
*Step, name=Step-drop-test
apply velocity for the mobile parts
*Dynamic, Explicit
, 0.0004
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
```

（10）为输出结果创建一个结点集。

执行“工具（Tools）→集（Set）→创建（Create）”命令，弹出“创建集”（Create Set）对话框，输入结点集的名称“Set-acceleration”，“类型”选择“结点”。

单击“继续”按钮，进入图形窗口选择实例 PART-MOBILE-REAR-HOUSING 上代表参考点 RP-1 的结点。

为速度场载荷施加创建另外一个结点集合，执行“工具（Tools）→集（Set）→创建（Create）”命令，弹出“创建集”对话框，输入结点集的名称“Set-velocity”，“类型”选择

"结点"。

单击"继续"按钮，进入图形窗口选择包括实例 PATR-MOBILE-REAR-HOUSING、实例 PART-MOBILE-BATTERY 和实例 PART-MOBILE-COVER 在内的全部结点。

使用命令更为简便。

```
*Nset, nset=Set-velocity, instance=PART-mobile-battery-1, generate
 29420,  31907,      1
*Nset, nset=Set-velocity, instance=PART-mobile-cover-1
 463431, 463432, 463433, 463434, 463435, 463436, 463437, 463438, 463439, 463440, 463441, 463442,
463443, 463444, 463445, 463446
***
*Nset, nset=Set-velocity, instance=PART-mobile-rear-housing-1, generate
 697816,  769940,      1
*Nset, nset=Set-acceleration, instance=PART-mobile-rear-housing-1
 703802,
```

在"设置管理器"对话框中显示创建的两个结点集合如图 14-38 所示（此处程序翻译为"设置管理器"，但实际应为"集管理器"更合理）。



图 14-38 "设置管理器"对话框

执行"输出（Output）→场输出请求（Field Output Requests）→管理器（Manager）"命令，弹出图 14-39 所示的"场输出请求管理器"（Field Output Requests Manager）对话框。



图 14-39 "场输出请求管理器"对话框

单击"创建"，弹出"创建场输出请求"对话框，单击"继续"按钮，进入"编辑场输出请求"（Edit Field Output Request）对话框，如图 14-40 所示。

设置"作用域"（Domain）为"整个模型"（Whole model），"频率"（Frequency）为"均匀时间间隔"（Every spaced time intervals），"间隔"（Interval）为"20"，"定时"

（Timing）为“近似时间的输出”（Output at approximate times），“输出变量”（Output Variables）为“应力”（S），单击“确定”按钮。

按前文再创建一个输出请求，其中“输出变量”按图 14-41 进行设置，单击“确定”按钮，并关闭“输出请求管理器”。



图 14-40 “编辑场输出请求”对话框

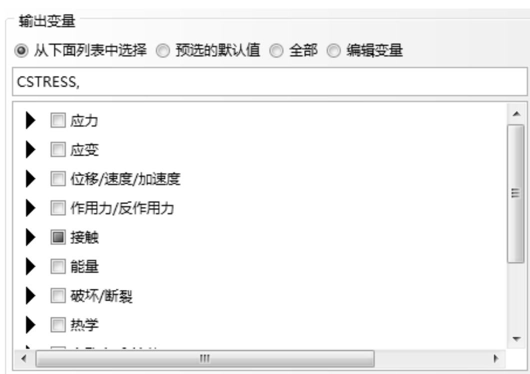


图 14-41 接触应力的输出请求

使用命令设置也比较方便。

```
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Element Output, directions=YES
S,
*Contact Output
CSTRESS,
```

执行“输出（Output）→历程输出请求（History Output Requests）→管理器（Manager）”命令，弹出图 14-42 所示的“历程输出请求管理器”（History Output Requests Manager）对话框。

单击“编辑”按钮，进入“编辑历程输出请求”（Edit History Output Request）对话框，设置“作用域”为“整个模型”，“频率”为“均匀时间间隔”，“间隔”为“20”，“定时”为“近似时间的输出”，“输出变量”为“ALLIE,ALLKE,ETOTAL”，如图 14-43 所示。

再单击“创建”（Create）按钮，创建一个新的输出要求“H-Output-2”，单击“继续”

按钮。



图 14-42 “历程输出请求管理器”对话框

在“编辑历程输出请求”对话框中，“作用域”选择“集（Set）：Set-acceleration”，“输出变量”为“AT”，单击“确定”按钮。

单击“历程输出请求管理器”的“关闭”按钮，退出对话框，完成分析结果数据输出的设定，如图 14-44 所示。



图 14-43 “编辑历程输出请求”对话框

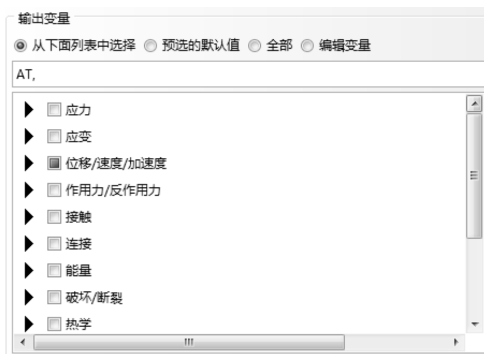


图 14-44 加速度的输出请求设置

历程输出命令控制方法如下。

```
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Energy Output
ALLIE, ALLKE, ETOTAL
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-2
**
```

```
*Node Output, nset=Set-acceleration
AT,
```

（11）进入“载荷”（Load）模块，执行“边界条件（BC）→创建（Create）”命令，或者单击工具箱中的“创建边界条件”，在弹出的图 14-45 所示的“创建边界条件”对话框中输入边界条件名称，“分析步”选择“Initial”，边界条件类型选择“位移/转角”，单击“继续”按钮。

选择实例 Part-rigid-plane 的参考点 RP，单击信息提示区的“完成”按钮，在图 14-46 所示的“编辑边界条件”（Edit Boundary Condition）对话框中选中“U1~UR3”复选框，单击“确定”按钮，约束实例 Part-rigid-plane 所有方向上的自由度。

也可以将如下命令插入到 STEP 之前，即可作为 Initial 分析步的边界与载荷。

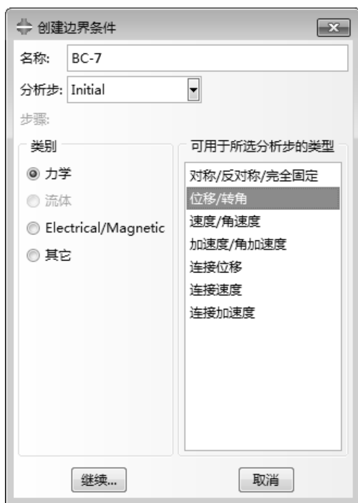


图 14-45 “创建边界条件”对话框



图 14-46 编辑边界条件

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: BC-constraint Type: 位移/转角
*Boundary
_PickedSet46, 1, 1
_PickedSet46, 2, 2
_PickedSet46, 3, 3
_PickedSet46, 4, 4
_PickedSet46, 5, 5
_PickedSet46, 6, 6
**
```

到这里完成了边界条件的定义，继续输入。

```
**
** PREDEFINED FIELDS
```

```
**
** Name: Predefined Field-velocity      Type: Velocity
*Initial Conditions, type=VELOCITY
Set-velocity, 1, 0.
Set-velocity, 2, -3.96
Set-velocity, 3, 0.
**
```

此时定义了预定义场，这样就给予模型以初速度。

```
**
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-general-contact
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
 ,  , IntProp-friction03
```

到这里就完成了 Initial 分析步的边界条件定义，创建了一个相互作用。

执行“预定义场（Predefined Field）→创建（Create）”命令，或者单击工具箱中的“创建预定义场”（Create Predefined Field），在弹出的图 14-47 所示的“创建预定义场”对话框中输入名称“Predefined Field-velocity”。“分析步”（Step）选择初始步“Initial”，“类别”（Category）选择“力学”（Mechanical），“可用于所选分析步的类型”（Types for Selected Step）选择“速度”（Velocity），单击“继续”按钮。

根据图形窗口底部信息提示区的选择区域类型（Choose type of region）选择“网格”（mesh）类型，之后单击底部信息提示区后面的“集”（Sets）按钮，弹出“区域选择”（Region Selection）对话框。

选择 Set-velocity 结点集合，单击“继续”按钮，进入“编辑预定义场”（Edit Predefined Field）对话框，如图 14-48 所示，选择“仅平移”（Translational only），输入 V1 为“0”，V2 为“-3.96”，V3 为“0”，单击“确定”按钮，完成实例手机模型速度场的定义。

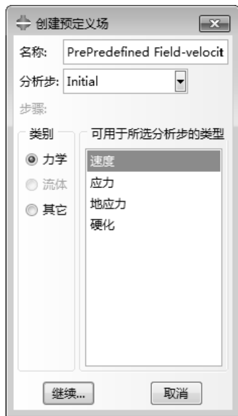


图 14-47 “创建预定义场”对话框



图 14-48 “编辑预定义场”对话框

（12）进入作业模块。

单击按钮，弹出图 14-49 所示的“创建作业”对话框，输入作业名称并选择“来源”为“模型”，单击“继续”，弹出图 14-50 所示的“编辑作业”对话框。



图 14-49 “创建作业”对话框

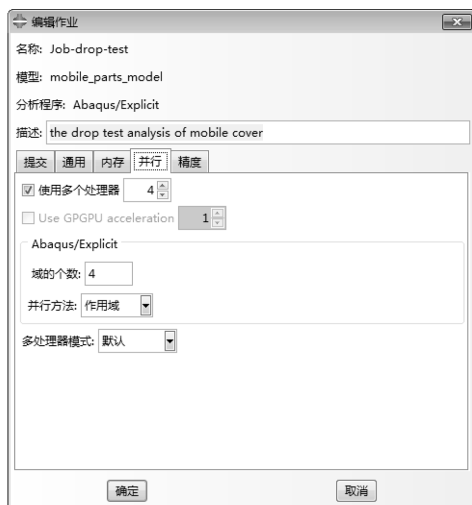


图 14-50 “编辑作业”对话框

在图 14-50 所示的“编辑作业”对话框中的“并行”选项卡下，可以设置并行计算。使用者可以根据自己使用的计算平台的配置进行调整。

本例使用的是 Intel Core i5-2450M 2.5GHz CPU，x64 平台，内存为 4GB。由于 i5 平台的超线程技术，双核心的 CPU 可以支持四个逻辑线程，因此本作业设置为使用 4 个处理器进行并行运算。

完成作业定义后，即可提交计算。

本例为读者提供完整 INP 文件，以供参考，请参阅光盘文件。

编辑完成 INP 文件即可提交计算。本例计算时间约半小时（Intel Core i5-2450M 2.5GHz CPU，x64 平台，内存 4GB），视不同平台而定。

（13）完成计算即可以进行后处理。进入“可视化”模块。

在视图区中显示最终的应力云图如图 14-51 所示。在图 14-51 中可以清楚地看到刚体与可变形体的不同。

本例主要目标为研究后盖的变形是否在可控范围内，现将刚体部件隐藏，模型如图 14-52 所示。

由于竖直方向发生碰撞，故首先关注 2 方向上应力的变化。图 14-53 所示为开始加速时的应力云图；图 14-54 所示的为 STEP=2，TIME=4.0007E-5 时竖直方向应力云图。

图 14-55 所示为 STEP=8，TIME=1.6001E-4 时应力云图；图 14-56 所示为 STEP=9，TIME=1.8001E-4 时竖直方向应力云图。

图 14-57 所示为 STEP=15，TIME=3.0000E-4 时应力云图；图 14-58 所示为 STEP=16，TIME=3.2001E-4 时竖直方向应力云图。

图 14-59 所示为 STEP=18，TIME=3.6000E-4 应力云图；图 14-60 所示为 STEP=20，

TIME=4.0000E-4 时竖直方向应力云图。

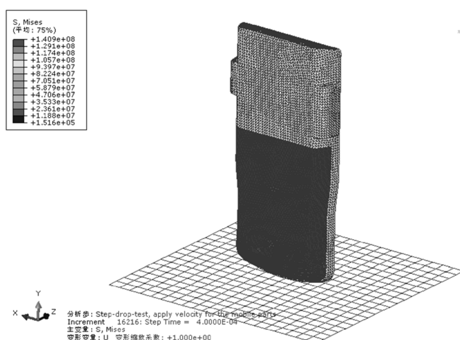


图 14-51　最终应力分布

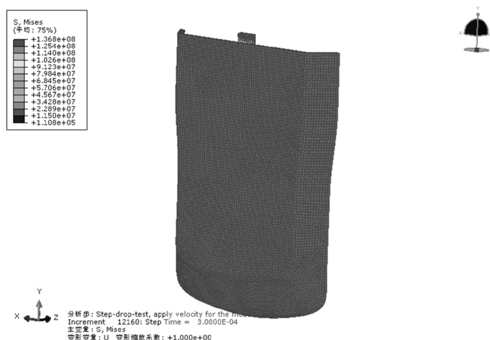


图 14-52　隐藏刚体



图 14-53　2 方向正应力，STEP=1

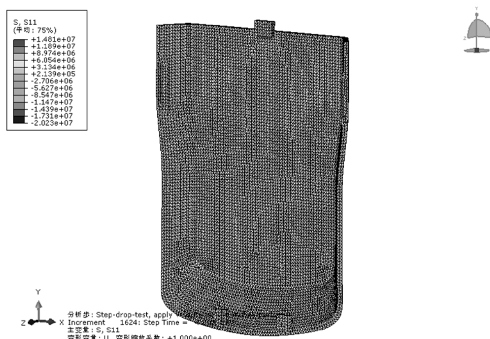


图 14-54　2 方向正应力，STEP=2

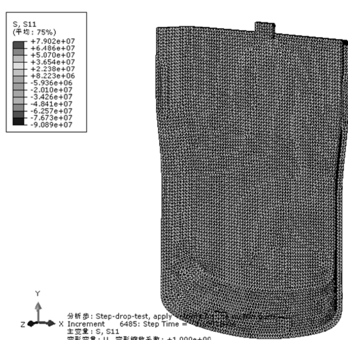


图 14-55　2 方向正应力，STEP=8

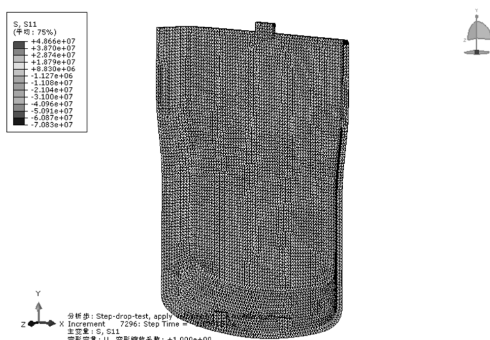


图 14-56　2 方向正应力，STEP=9

在可视化模块中也可以直观地看到变形。

图 14-61 所示为开始加速时的变形云图；图 14-62 所示的为 STEP=2，TIME=4.0007E-5 时变形云图。

图 14-63 所示为 STEP=8，TIME=1.6001E-4 时变形云图；图 14-64 所示为 STEP=9，TIME=1.8001E-4 时变形云图。



图 14-57　2 方向正应力，STEP=15

图 14-58　2 方向正应力，STEP=16



图 14-59　2 方向正应力，STEP=18

图 14-60　2 方向正应力，STEP=20

图 14-61　空间位移云图，STEP=1

图 14-62　空间位移云图，STEP=2

图 14-65 所示为 STEP=15，TIME=3.0000E-4 时变形云图；图 14-66 所示为 STEP=16，TIME=3.2001E-4 时变形云图。

图 14-67 所示为 STEP=18，TIME=3.6000E-4 时变形云图；图 14-68 所示为 STEP=20，TIME=4.0000E-4 时变形云图。

执行“结果（Result）→历程输出（History Output）”命令，弹出“历程输出”（History Output）对话框，在对话框中分别选中 ALLIE、ALLKE 以及 ETOTAL，单击“绘制”（Plot）按钮，显示系统内能曲线如图 14-69 所示，系统的动能曲线如图 14-70 所示。



图 14-63 空间位移云图，STEP=8

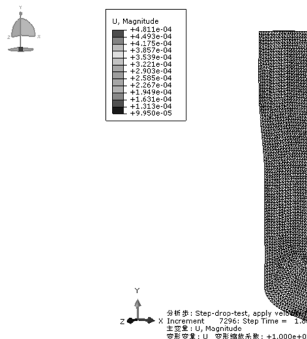


图 14-64 空间位移云图，STEP=9

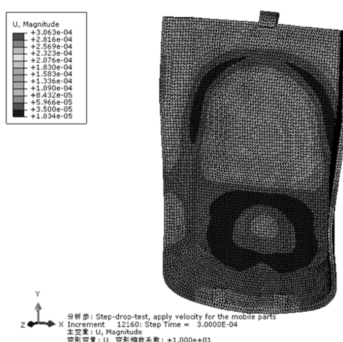


图 14-65 空间位移云图，STEP=15

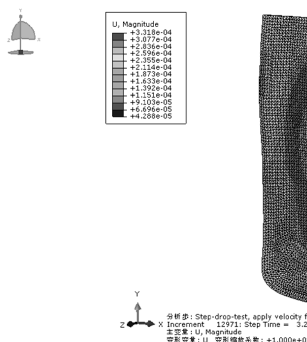


图 14-66 空间位移云图，STEP=16

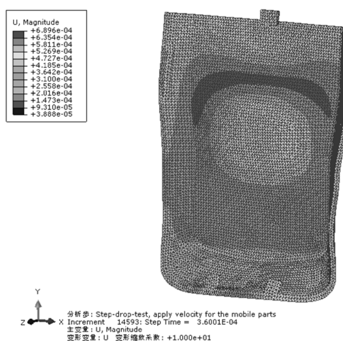


图 14-67 空间位移云图，STEP=18

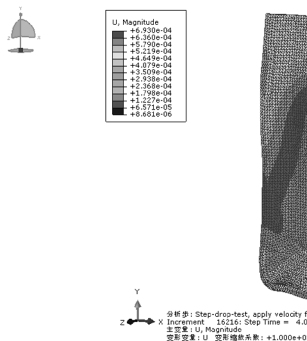


图 14-68 空间位移云图，STEP=20

系统总能量曲线如图 14-71 所示。

再次执行“结果（Result）→历程输出（History Output）”命令，弹出图 14-72 所示的“历程输出”对话框，在对话框中分别选中 A1PI、A2PI、A3PI，单击“绘制”按钮，绘制方向 1 加速度曲线如图 14-73 所示；方向 2 加速度曲线如图 14-74 所示；方向 3 加速度曲线如图 14-75 所示。

由于本例所选取模型的特殊性（不完整的手机模型），又由于计算资源和时间成本的限制，而将手机后壳体约束成为刚体，因此本例所得的刚体冲击加速度不具有参考价值。

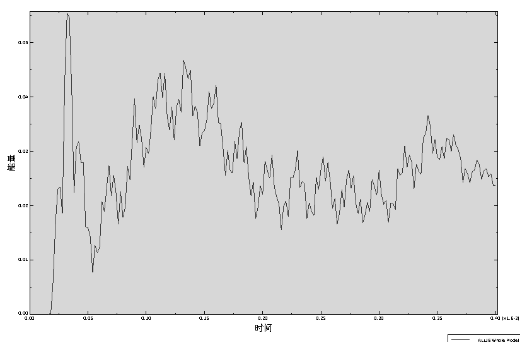


图 14-69　内能曲线

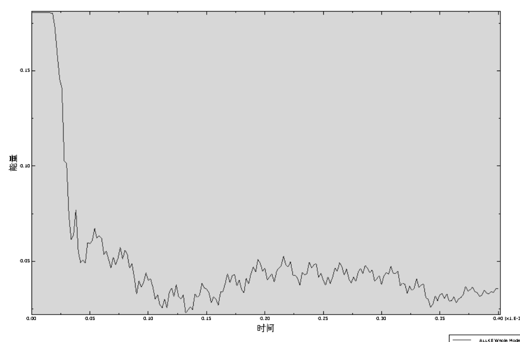


图 14-70　动能曲线

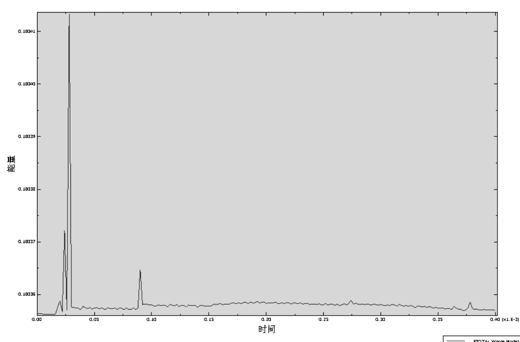


图 14-71　总能量曲线

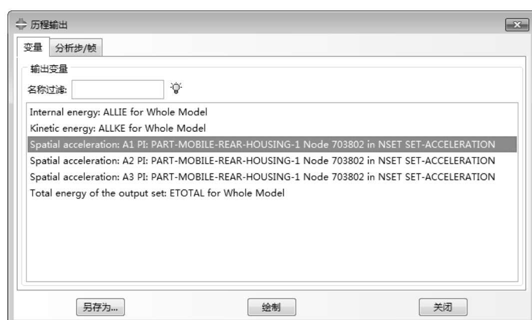


图 14-72　历程输出对话框

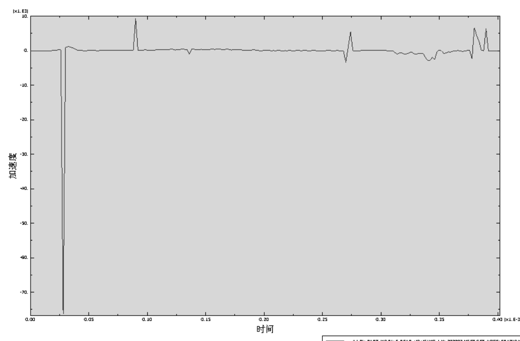


图 14-73　方向 1 加速度曲线

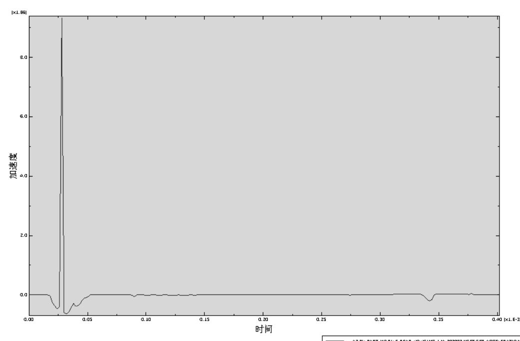


图 14-74　方向 2 加速度曲线

这里将加速度曲线绘出有两方面目的。一方面，建议读者在做类似案例分析时，一定要在结果输出数据中设定该变量的输出，因为此变量可以作为模拟分析结果数据正确与否的参考；另一方面，这里将其提出是为了找出手机模型和刚性墙碰撞瞬间的时间点。

通过以上输出的系统能量图以及冲击加速度曲线图可以分析出手机模型和刚性墙瞬间碰撞的时间点大约在 0.038×10^3s。

在弹出的对话框中选择“Step-drop-test”分析步，并在“Frame”对话框下选择第二个增长步（时间点大约是在 0.04×10^3s）。

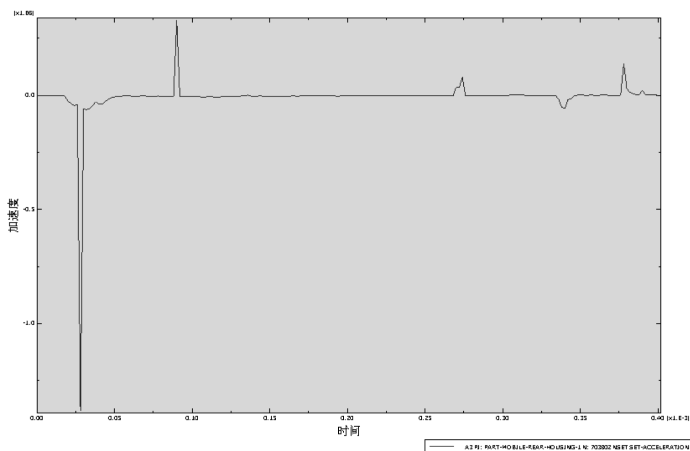


图 14-75　方向 3 加速度曲线

由于系统所取时间步长的原因，这里不能准确选取碰撞瞬间的时间点，单击“应用”（Apply）按钮，显示手机模型和刚性墙碰撞瞬间手机电池盖的 Mises 应力云图，如图 14-76 所示，发生水平滑移时应力云图如图 14-77 所示。

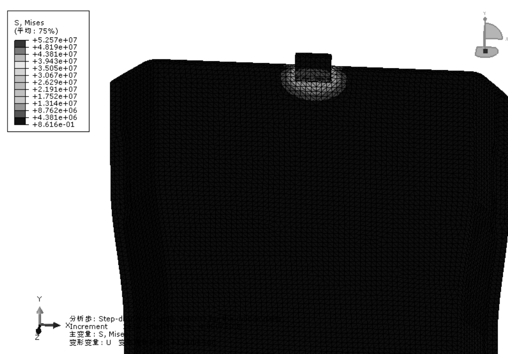


图 14-76　碰撞瞬间应力云图

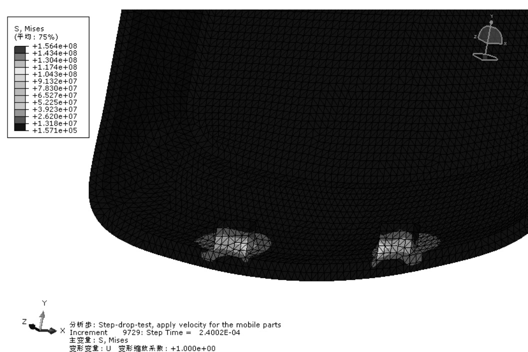


图 14-77　滑移时应力云图

执行“动画（Animate）→时间历程（Time History）”命令，动画显示手机电池盖模型整个碰撞过程中 Mises 应力的变化云图，使用环境栏中的 工具，可以分步显示碰撞过程。

也可以通过执行“结果（Result）→场输出（Field Output）”命令，在“场输出”对话框中选择“空间位移 U 变量”，单击“确定”按钮，通过动画显示碰撞过程中手机电池盖模型的位移变化情况。

本例分析的目的就是关注手机跌落过程中手机电池盖的设计强度是否符合要求，即手机电池盖的卡扣强度设计是否能保证在跌落过程中手机电池盖不开裂以及手机电池不脱落。

通过以上后处理结果输出的碰撞瞬间手机电池盖的 Mises 应力云图分析，手机电池盖的设计是符合设计要求的，从图 14-76 可以看出碰撞瞬间，手机电池盖所受最大应力为 53.02MPa（<80MPa），发生区域是在手机电池盖的最上面卡扣处。

但是通过整个跌落过程动画的 Mises 应力的变化云图来看，在手机模型和刚性墙碰撞后，其在刚性墙上滑移了一段时间并弹起。由于惯性的作用，手机电池盖所受的应力继续增加，并且出现应力数据上下波动，在时间点大约 2.4×10^3s 时达到了最大应力值 157.1MPa（>80MPa），这个应力数据已经超出了本例所设定的 80MPa 的应力屈服极限。

本例的结果数据存在一定的误差，主要是由于以下原因。

由于案例的关注重点是怎样运用 ABAQUS 软件进行跌落模拟分析，因此对分析模型采用了特殊的处理方法：手机后壳体约束为刚体。这在整个模型和刚性墙碰撞过程中，使得手机电池盖在与手机后壳体之间的接触区域没有缓冲，只有一方强制挤压另一方，导致手机电池盖局部接触应力过大。

本例在进行手机电池盖的材料模型定义时，并没有考虑手机电池盖塑胶材料的塑性硬化数据的定义，塑胶材料硬化数据在塑胶材料失效分析时是很重要的，出于简化操作与计算时间考虑未作定义。

在具体跌落分析案例中，结果变量的数据输出一定要考虑好，不要浪费计算资源和时间成本。特别对大型的分析项目，对每一个结果变量的输出都应该作出具体考量，输出的每一个结果变量数据都应该对计算模拟结果的精确性起到一定作用。

例如本例中能量变量数据的输出、冲击加速度变量数据的输出等都对后处理的结果数据具有重要的参考价值。

14.2.2 ABAQUS/Explicit 实例——弹丸侵蚀靶体的分析

冲击动力学问题存在于许多工程领域中，如高速穿甲（如飞弹打击或穿透靶体及其侵彻过程）、鸟撞飞机风挡、汽车碰撞、金属压力成型和救生弹射座椅受冲击等。

日常生活中的榔头敲击钉子，也属于冲击动力学。物体在冲击载荷下的力学响应往往与静载下有显著不同，其结构可能发生大变形、大转动，材料可能进入塑性状态。这涉及几何非线性、材料非线性和边界条件非线性的问题。

冲击动力学主要就是研究弹性体在瞬变、动载荷作用下的运动、变形和破坏规律，目前该方向的发展很迅速。当物体的局部位置受到冲击载荷的作用时，结构将在很短的时间内达到最大的响应，物体结构的动态响应主要表现在结构的变形以及随时间发展，最终引起结构的断裂、贯穿或破坏。

结构在冲击载荷作用下产生的响应形式取决于结构的几何尺寸、材料参数、初始缺陷、载荷峰值以及载荷持续时间等诸多因素，因而结构动力响应问题非常复杂。

有限元分析中的显式方法最初就是为了分析那些用隐式方法分析起来可能极端费时的高速动力学事件，这类事件的特点是响应时间非常短暂，事件发生期间一般都会伴随着材料退化或者失效，材料遭到破坏而失效一直以来都是有限元分析的热点和难点，本节提供的弹丸侵蚀靶体的案例就属于典型代表。

本例的几何模型比较简单，仅包括弹丸和靶体两个部件，该案例分析的关注重点是材料失效模型的建立以及高速撞击案例分析的注意事项。为了提高计算效率及模拟精度，作者对弹丸和靶体部件进行了简化，且网格都采用六面体单元划分，网格划分得非常精细，分析模型中两个部件之间的接触采用通用接触算法定义，具体分析模型如图 14-78 所示。

分析模型量纲系统采用 SI 标准。整体模型属性详见表 14-3，分析模型各部件尺寸详见图 13-24（其尺寸都为装配模型中全局坐标系下测量的尺寸，单位为 mm）。

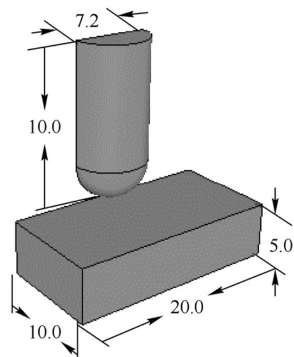


图 14-78　弹丸侵蚀靶体模型图

表 14-3　弹丸侵蚀靶体仿真分析有限元整体模型属性表

部件	ρ/（kg/m³）	E/Pa	v	材料失效准则定义
弹丸	7.8×10^3	2.1×10^{11}	0.30	约束为刚体
靶体				参照靶体材料的属性定

（1）首先开始部件的创建。在 INP 命令中，含有以下信息，说明本例是基于 ABAQUS 6.12 创建的。

```
*Heading
 the failure analysis of bullet eroding target
** Job name: Job-impact Model name: bullet-target
** Generated by: Abaqus/CAE 6.12-1
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
```

启动 ABAQUS/CAE，单击按钮，弹出图 14-79 所示的“编辑部件”，对话框“类型”定义为“旋转壳”，大约尺寸为“0.08”，单击“继续”，绘制图 14-80 所示的截面草图。



图 14-79 “创建部件”对话框

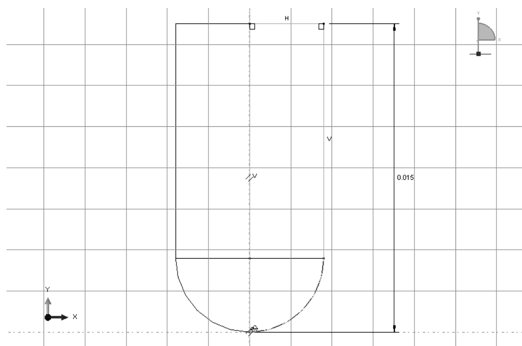


图 14-80　截面草图

单击中键，设置旋转角度为“180”，单击“确定”，生成子弹的半模型如图 14-81 所示。

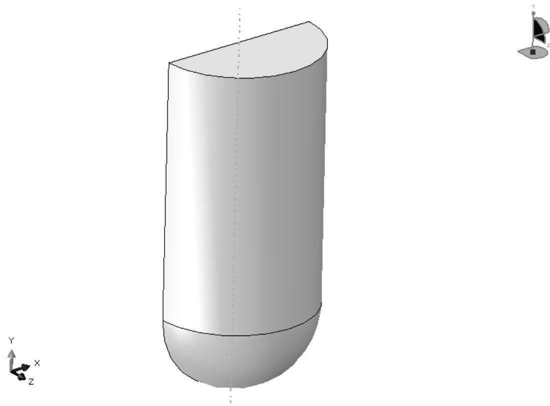


图 14-81　子弹半模型

在编写命令时，此时就可以写入截面与材料信息，先将参数的名称声明完成。

```
** Section: Section-bullet-target
*Solid Section, elset=_PickedSet29, material=Material-bullet-target
1.,
```

参考上述过程，创建靶体的模型，截面草图如图 14-82 所示，与子弹不同之处在于模型的“类型”定义为“拉伸”，拉伸的深度为“0.005”，创建好的模型如图 14-83 所示。

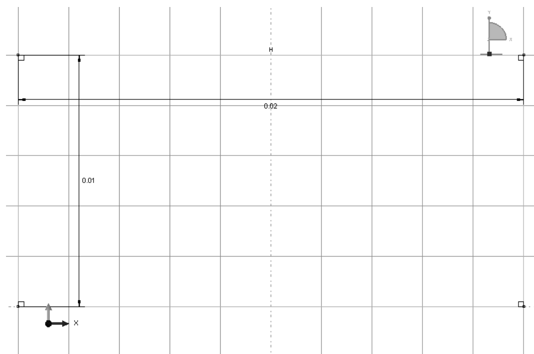


图 14-82　靶体草图

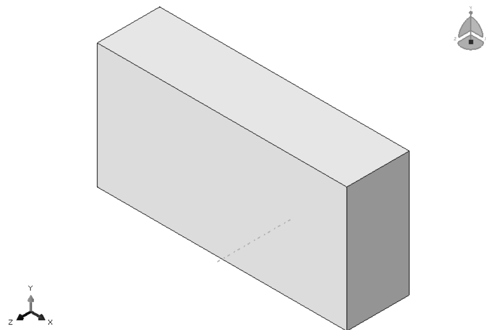


图 14-83　靶体模型

编写命令时，可以先声明截面与材料的名称。

```
** Section: Section-bullet-target
*Solid Section, elset=_PickedSet27, controls=EC-1, material=Material-bullet-target
1.,
```

（2）接下来开始定义材料属性。由于本例涉及材料高度非线性变形及破坏，包含材料的侵彻，材料属性的定义是本例的关键操作。

进入“属性”模块。单击按钮，在图 14-85 所示的“编辑材料”对话框中，定义材料的密度与弹性行为，将名称定义为“Material-bullet-target”，定义的密度如图 14-85 所示。弹

性材料参数如图 14-86 所示。

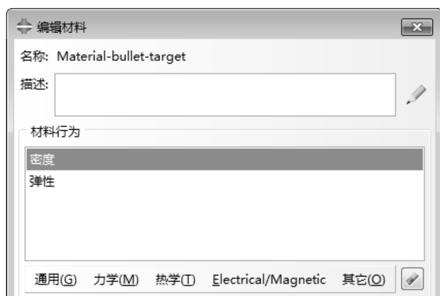


图 14-84 “编辑材料”对话框



图 14-85 密度参数设置

在模型树中模型名称上单击右键，选择“编辑关键字”，弹出图 14-87 所示的 Edit key words（关键字编辑器）。



图 14-86 弹性参数设置

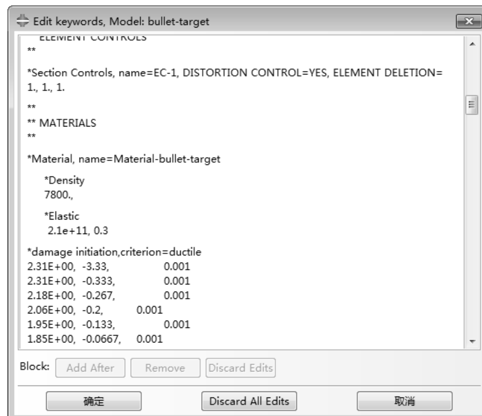


图 14-87 Edit key words（关键字编辑器）对话框

在*Elastic 块后添加内容。把光标置于*Elastic 之后，单击 Block 后面的“AddAfter”按钮，在*Elastic 后面添加靶体材料失效的判定准则数据。

```
*damage initiation,criterion=ductile
2.31E+00,  -3.33,      0.001
2.31E+00,  -0.333,     0.001
2.18E+00,  -0.267,     0.001
2.06E+00,  -0.2,       0.001
1.95E+00,  -0.133,     0.001
1.85E+00,  -0.0667,    0.001
1.76E+00,  0.,         0.001
1.67E+00,  0.0667,     0.001
1.59E+00,  0.133,      0.001
1.52E+00,  0.2,        0.001
```



```
1.46E+00,  0.267,        0.001
1.40E+00,  0.333,        0.001
1.35E+00,  0.4,          0.001
1.30E+00,  0.467,        0.001
1.26E+00,  0.533,        0.001
1.23E+00,  0.6,          0.001
1.20E+00,  0.667,        0.001
1.15E+00,  0.730,        0.001
1.06E+00,  0.851,        0.001
9.45E-01,  1.02,         0.001
8.16E-01,  1.24,         0.001
6.85E-01,  1.51,         0.001
2.02E-01,  3.33,         0.001
*damage evolution,type=energy,softening=exponential
5e2
*damage initiation,criterion=Shear, KS=0.03
8.60E-01,  -1.00E+01,    0.001
8.60E-01,  1.70E+00,     0.001
8.59E-01,  1.72E+00,     0.001
8.60E-01,  1.73E+00,     0.001
8.65E-01,  1.75E+00,     0.001
8.74E-01,  1.77E+00,     0.001
8.86E-01,  1.78E+00,     0.001
9.01E-01,  1.80E+00,     0.001
9.21E-01,  1.81E+00,     0.001
9.44E-01,  1.83E+00,     0.001
9.70E-01,  1.85E+00,     0.001
1.00E+00,  1.86E+00,     0.001
1.04E+00,  1.88E+00,     0.001
1.08E+00,  1.89E+00,     0.001
1.12E+00,  1.91E+00,     0.001
1.17E+00,  1.92E+00,     0.001
1.22E+00,  1.94E+00,     0.001
1.28E+00,  1.96E+00,     0.001
1.34E+00,  1.97E+00,     0.001
1.41E+00,  1.99E+00,     0.001
1.48E+00,  2.00E+00,     0.001
1.56E+00,  2.02E+00,     0.001
1.56E+00,  1.00E+01,     0.001
*damage evolution,type=energy,softening=exponential
5e2
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0
7.76E+08,  0,
8.09E+08,  0.01,
8.29E+08,  2.00E-02,
8.42E+08,  3.00E-02,
```

```
8.66E+08, 6.00E-02,
8.83E+08, 1.00E-01,
8.95E+08, 1.50E-01,
9.10E+08, 2.50E-01,
9.22E+08, 4.00E-01,
9.53E+08, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic,Rate=0.001
7.91E+08, 0.00E+00,
8.24E+08, 1.00E-02,
8.46E+08, 2.00E-02,
8.63E+08, 3.00E-02,
8.99E+08, 6.00E-02,
9.31E+08, 1.00E-01,
9.58E+08, 1.50E-01,
9.95E+08, 2.50E-01,
1.03E+09, 4.00E-01,
1.17E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0.01
7.99E+08, 0.00E+00,
8.31E+08, 1.00E-02,
8.55E+08, 2.00E-02,
8.74E+08, 3.00E-02,
9.16E+08, 6.00E-02,
9.55E+08, 1.00E-01,
9.89E+08, 1.50E-01,
1.04E+09, 2.50E-01,
1.09E+09, 4.00E-01,
1.28E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0.1
8.05E+08, 0.00E+00,
8.38E+08, 1.00E-02,
8.63E+08, 2.00E-02,
8.84E+08, 3.00E-02,
9.33E+08, 6.00E-02,
9.78E+08, 1.00E-01,
1.02E+09, 1.50E-01,
1.08E+09, 2.50E-01,
1.14E+09, 4.00E-01,
1.39E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=1.
8.08E+08, 0.00E+00,
8.42E+08, 1.00E-02,
8.69E+08, 2.00E-02,
8.93E+08, 3.00E-02,
9.46E+08, 6.00E-02,
9.98E+08, 1.00E-01,
```



```
1.05E+09, 1.50E-01,
1.12E+09, 2.50E-01,
1.19E+09, 4.00E-01,
1.49E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=10.
8.10E+08, 0.00E+00,
8.46E+08, 1.00E-02,
8.76E+08, 2.00E-02,
9.01E+08, 3.00E-02,
9.60E+08, 6.00E-02,
1.02E+09, 1.00E-01,
1.07E+09, 1.50E-01,
1.15E+09, 2.50E-01,
1.24E+09, 4.00E-01,
1.60E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=100.
8.12E+08, 0.00E+00,
8.50E+08, 1.00E-02,
8.82E+08, 2.00E-02,
9.09E+08, 3.00E-02,
9.74E+08, 6.00E-02,
1.04E+09, 1.00E-01,
1.10E+09, 1.50E-01,
1.19E+09, 2.50E-01,
1.28E+09, 4.00E-01,
1.70E+09, 2.00E+00,
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=1000.
8.15E+08, 0.00E+00,
8.55E+08, 1.00E-02,
8.88E+08, 2.00E-02,
9.17E+08, 3.00E-02,
9.87E+08, 6.00E-02,
1.06E+09, 1.00E-01,
1.13E+09, 1.50E-01,
1.23E+09, 2.50E-01,
1.33E+09, 4.00E-01,
1.81E+09, 2.00E+00,
```

单击“确定”，完成材料编辑。

在该操作中，使用命令才是最高效的，也更为直观。在“关键字编辑器”中的命令如下，数据不再重复，已略去。

```
** MATERIALS
**
*Material, name=Material-bullet-target
*Density
7800.,
```

```
*Elastic
 2.1e+11, 0.3
*damage initiation,criterion=ductile
***
*damage evolution,type=energy,softening=exponential
5e2
*damage initiation,criterion=Shear, KS=0.03
***
*damage evolution,type=energy,softening=exponential
5e2
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0
***
*Plastic, Hardening=Isotropic,Rate=0.001
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0.01
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=0.1
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=1.
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=10.
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=100.
***
*Plastic, Hardening=Isotropic, Rate=1000.
***
**
```

本例中材料失效准则的判定包括材料初始失效的判定和材料累进失效积累的判定，其中材料初始失效的判定由两种方法（ductile 和 shear）共同确定其初始失效点的位置，材料累进失效的判定准则中包括材料初始失效后的硬化数据。

ABAQUS 软件提供了以下两种模型来模拟和预测关于两类材料的累进破坏和失效，一种失效模型是专门针对延性金属材料的；另一种失效模型是专门针对加强型纤维材料的。

对于延性金属材料的累进破坏和失效，ABAQUS/Explicit 提供了一种通用的模拟能力，也可以结合 Mises 模型、Johnson-Cook 模型、Hill 模型以及 Drucker-Prager 塑性模型等一起应用，对于大部分具体的材料累进破坏和失效分析案例，一般来说都需要指定材料分析模型的以下三个方面。

■ 延性金属材料没有损伤区域的弹塑性响应。

具体就是指定分析材料累进破坏和失效模型的弹性模量、泊松比以及塑性相关的一些参数。

■ 延性金属材料初始损伤准则。

对于延性金属初始损伤准则的设定，ABAQUS/Explicit 提供了多种模型让使用者来选择，每种初始损伤模型都可以应用到不同种类的失效材料上，它们可以归为以下两大类：

对于断裂（fracture）延性金属初始损伤准则的设定，可以选用延性准则（ductile

criteria）和剪切准则（shear criteria）；

对于颈缩（necking）延性金属初始损伤准则的设定，可以选用 M-K 准则、FLD 准则、FLSD 准则等。

对于某种具体材料可以指定超过一种初始损伤准则，当多种初始损伤准则赋到同一种材料上时，每一种初始损伤准则都是独立计算的。在分析过程中一旦某一种初始损伤准则被满足，根据指定的损伤演化准则，材料的刚度将逐渐退化。

■ 延性金属材料损伤演化准则。

延性金属材料损伤演化准则描述的是在分析过程中，一旦某一种初始损伤准则被赋予到一种材料上，那么材料模型将进入材料操作演化阶段，即材料刚度退化速率的问题。对于分析模型上后处理失效单元的移除，ABAQUS 采用的是当材料刚度退化达到最大值时（材料失效准则中设定），模型上失效的局部单元可以通过相关后处理命令将之删除，具体设定内容可以参照 ABAQUS 用户手册相关章节。

对于一个具体分析模型的材料累进破坏和失效准则的定义，可以包括以下全部或部分的关键字。

■ *ELASTIC

具体执行路径：

Property module、material editor、Mechanical、Elasticity、Elastic

■ *PLASTIC

具体执行路径：

material editor、Mechanical、Plasticity、Plastic

■ *DAMAGE INITIATION,CRITERION=……

具体执行路径：

material editor、Mechanical、Damage for Ductile Metals、……

■ *DAMAGE EVOLUTION,TYPE=……,SOFTENING=……

具体执行路径：

Property module、material editor、Mechanical、Damage for Ductile Metals

单击按钮，弹出图 14-88 所示的“创建截面”对话框，输入名称，选择均质实体截面，单击“继续”，弹出图 14-89 所示的“编辑截面”对话框，选择上一次创建的材料，单击“确定”完成截面的定义。



图 14-88 “创建截面”对话框

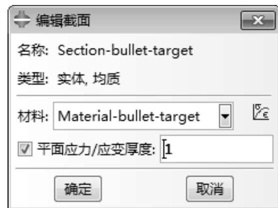


图 14-89 “编辑截面”对话框

单击按钮，将此截面指派给靶体模型。

（3）完成材料的定义，即可开始划分模型网格。

进行网格划分前，首先要对子弹进行分区。单击按钮，在提示区单击“三个点”按钮，使用图 14-90 中标出的三个点来定义分区，将子弹分为两个区如图 14-91 所示。

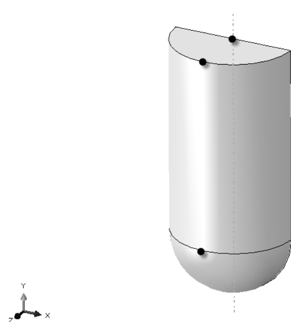


图 14-90 确定分区平面的点

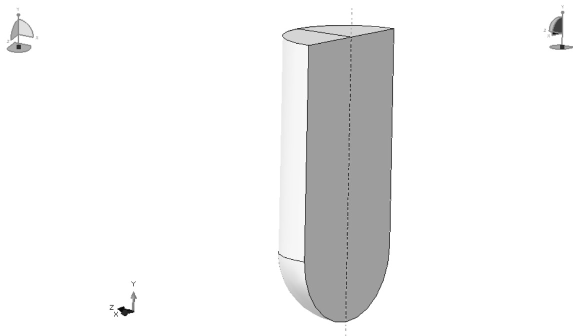


图 14-91 纵向的切分

重复上述操作，使用图 14-92 所示的点将子弹头部的半球切分，如图 14-93 所示，注意此时与图 14-91 的区别。

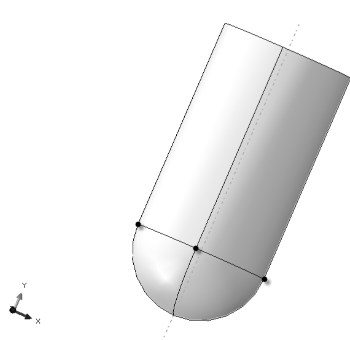


图 14-92 确定分区平面的点

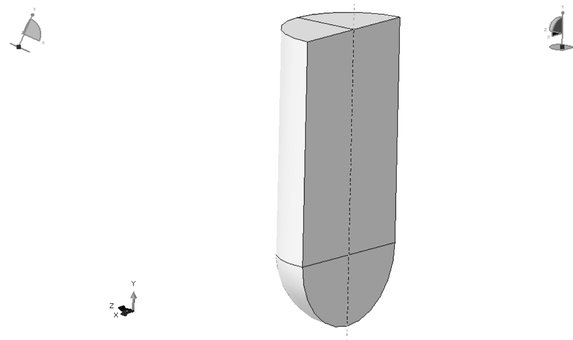


图 14-93 横向的切分

单击“网格”模块中的按钮，进行如图 14-94 所示的全局种子设置。完成布种如图 14-95 所示。

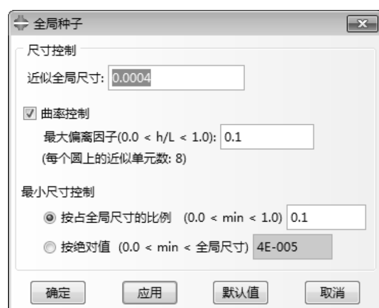


图 14-94 “全局种子”对话框

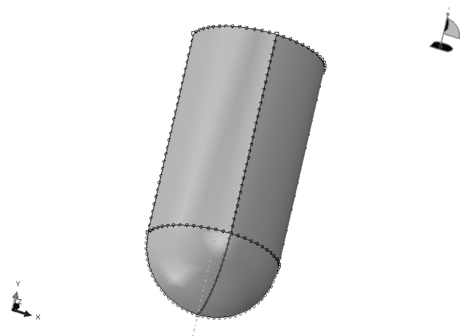


图 14-95 布种

单击按钮，选择图 14-96 所示的四条边，设置局部种子为“0.003”，完成局部种子设置。

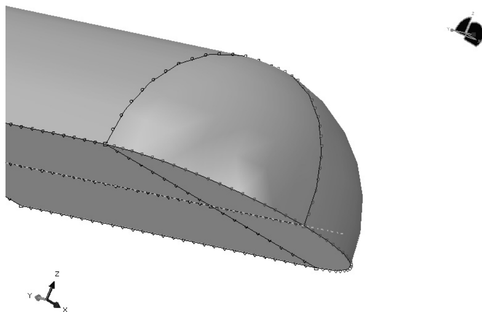


图 14-96　局部种子

单击按钮，选择整个子弹模型，单击中键，弹出图 14-97 所示的“网格控制属性”对话框，选择“结构”化划分方式，单击“确定”。再单击按钮，弹出图 14-98 所示的“单元类型”对话框，选择 C3D8R（八结点线性六面体单元，减缩积分，沙漏控制）单元，如图 14-98 所示。



图 14-97 “网格控制属性”对话框



图 14-98 “单元类型”对话框

再单击按钮，单击中键完成网格划分，如图 14-99 与图 14-100 所示。

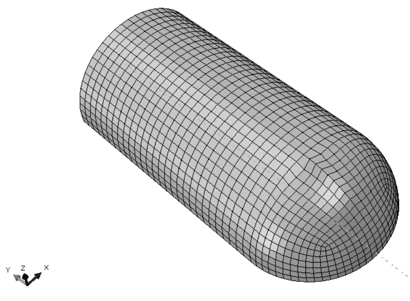


图 14-99　子弹外表面

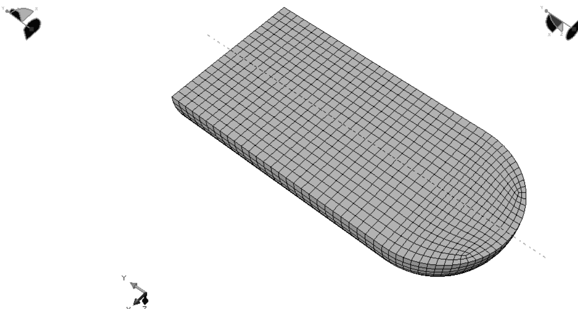


图 14-100　子弹纵截面

此处需要插入如下所示的网格控制命令。

** Constraint: Constraint-rigid-body

*Rigid Body, ref node=_PickedSet30, elset=_PickedSet31

参考上述方法，对靶体模型设置网格的大约尺寸为“0.0003”，其他设置默认，划分靶体的网格如图 14-101 所示。

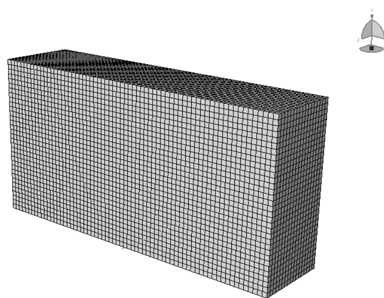


图 14-101　靶体的网格

（4）进入“装配”模块，单击按钮，弹出图 14-102 所示的“创建实例”对话框，实例的初始位置如图 14-103 所示。



图 14-102　“创建实例”对话框

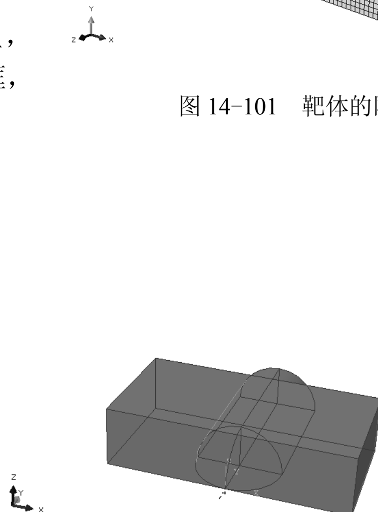


图 14-103　实例的初始状态

使用图 14-104 所示的装配工具将实例调整到图 14-105 所示的位置（截面对正、中心对齐）。



图 14-104　装配工具

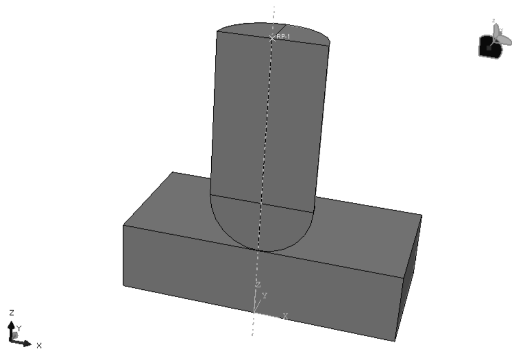


图 14-105　实例位置

在对分析模型的各个部件进行装配约束选项的选择时，装配约束选项可能有很多，例如点、线以及面等，其中所选择的装配约束施加的第一个装配实体可以移动，而装配约束施加的第二个装配实体不可以移动。

使用命令可以直接指定部件的位置。

```
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Part-bullet-1, part=Part-bullet
 -5.31105888065192e-35,    -4.33680868994202e-19,         0.005
 -5.31105888065192e-35,    -4.33680868994202e-19,    0.005,    4.32978055978831e-17,
0.707106811231781, 0.712106811231781,    180.
*End Instance
**
*Instance, name=Part-target-1, part=Part-target
*End Instance
**
```

（5）单击按钮，在弹出的“创建相互作用属性”对话框中选择“接触”，单击“继续”，在图 14-106 所示的“编辑接触属性”对话框中，定义一个切向行为与一个法向行为。

切向行为为“无摩擦”，如图 14-106 所示，法向行为为“硬接触”，如图 14-107 所示。



图 14-106 “编辑接触属性”对话框

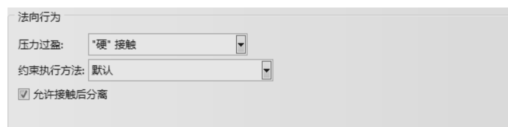


图 14-107 法向行为设置

创建接触的命令如下。

```
**
** INTERACTION PROPERTIES
**
*Surface Interaction, name=IntProp-impact
*Friction
0.,
*Surface Behavior, pressure-overclosure=HARD
**
```

单击按钮，创建一个相互作用，“类型”为“通用接触”(Explicit)，选择“分析步”为“Initial”。

单击“继续”后弹出“编辑相互作用”对话框，设置如图 14-108 所示，注意接触区域应选择为“全部*含自身”，相互作用属性选择上一步创建的相互作用属性，单击“确定”完成。

将如下命令插入到 STEP 块之前，即可以将该相互作用定义在 Initial 分析步。

```
**
```

```
** INTERACTIONS
**
** Interaction: Int-bullet-target
*Contact, op=NEW
*Contact Inclusions, ALL EXTERIOR
*Contact Property Assignment
 ,   , IntProp-impact
```

执行“工具→参考点”命令，在视图区中选择图 14-109 所示的 RP-1 所在位置，创建一个参考点。

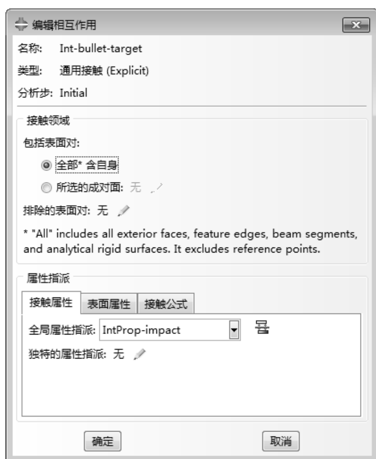


图 14-108 “编辑相互作用”对话框

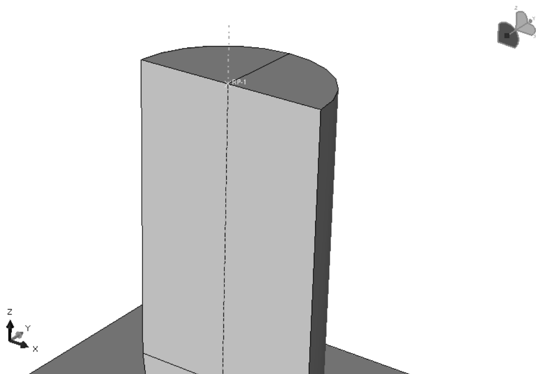


图 14-109 参考点位置

单击按钮，弹出图 14-110 所示的“创建约束”对话框，选择“刚体”，单击“继续”。弹出图 14-111 所示的“编辑约束”对话框，选择“体（单元）”类型，单击按钮，选择子弹，单击中键，在参考点右侧单击按钮，选择上一步创建的参考点，单击“确定”完成刚体约束的创建。



图 14-110 创建约束



图 14-111 “编辑约束”对话框

也可直接在“关键字编辑器”中输入如下命令。

** Constraint: Constraint-rigid-body
*Rigid Body, ref node=_PickedSet30, elset=_PickedSet31

完成约束如图 14-112 所示。

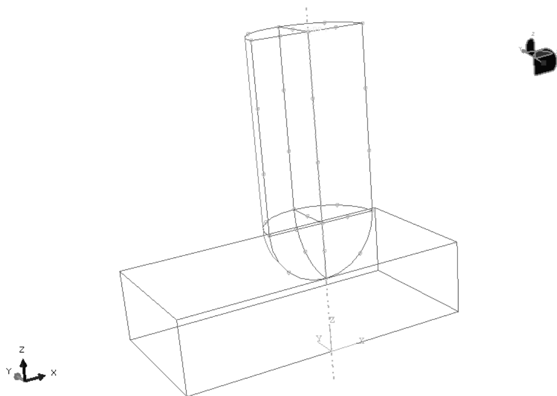


图 14-112　刚体约束

（6）进入“分析步”模块，开始创建分析步。

单击按钮，创建一个“动力，显式”分析步，在图 14-113 所示的“编辑分析步”对话框中，对分析步进行定义——输入时间长度为“1.2E-005”，单击“确定”完成。

再单击，对已有的一个场输出请求进行如图 14-114 所示的设置。在图 14-114 所示的“编辑场输出请求”对话框中，输入输出变量为“A,CFORCE,CSTRESS,PEEQ,S,STATUS,U,V,”，单击“确定”退出。



图 14-113　“编辑分析步”对话框

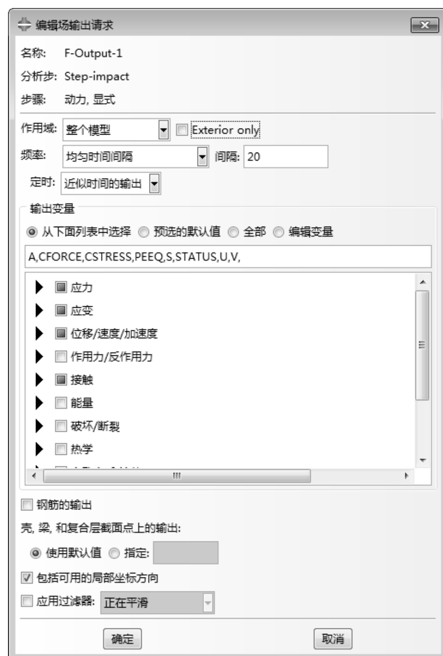


图 14-114　“编辑场输出请求”对话框

使用如下命令进行分析步的创建。

```
**
** STEP: Step-impact
**
*Step, name=Step-impact
Bullet eroding target
*Dynamic, Explicit
, 1.2e-05
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
```

在最后也可以使用如下命令定义场输出请求。

```
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, number interval=1, time marks=NO
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
*Node Output
A, U, V
*Element Output, directions=YES
PEEQ, S, STATUS
*Contact Output
CFORCE, CSTRESS
```

单击“历程输出请求”右侧的按钮，对已有的一个历程输出请求进行编辑，如图 14-115 所示，设置输出的项目为“ALLIE,ALLKE,ALLWK,ETOTAL,”，单击“确定”完成设置。

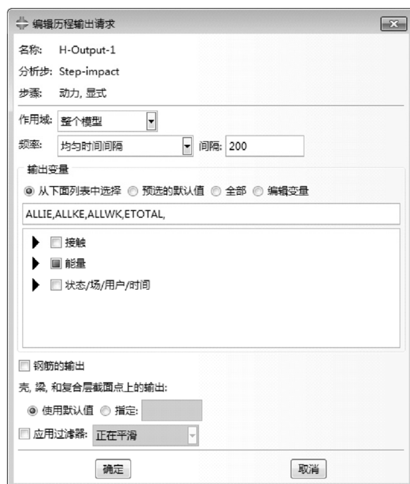


图 14-115 “编辑历程输出请求”对话框

以下命令插入到分析步的最后，用以定义历程输出。

```
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history
*Energy Output
ALLIE, ALLKE, ALLWK, ETOTAL
```

（7）进入“载荷”模块，开始定义边界条件与载荷。

单击按钮，弹出图 14-116 所示的“创建边界条件”对话框，选择“力学”类别下的“对称/反对称/完全固定”类型，单击“继续”，选择图 14-117 所示的面。



图 14-116 “创建边界条件”对话框

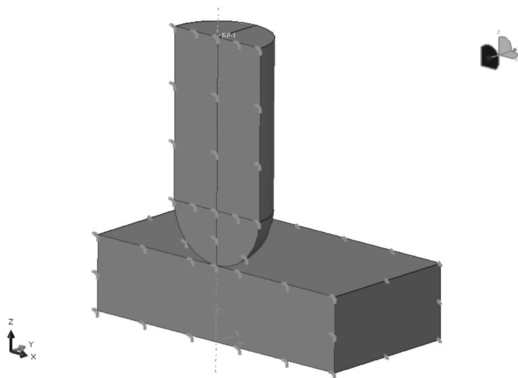


图 14-117 对称约束面

单击中键，弹出图 14-118 所示的“编辑边界条件”对话框，选择“YSYMM（U2=UR1=UR3=0）”。

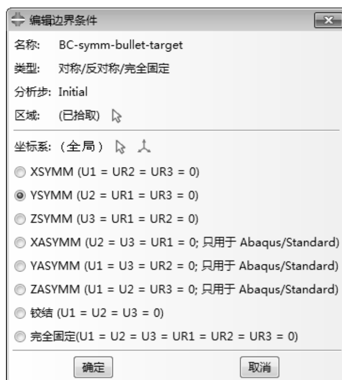


图 14-118 “编辑边界条件”对话框

以下这些命令定义在 STEP 块之前，用于创建边界条件。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
```

```
** Name: BC-fixed-target Type:  对称/反对称/完全固定
*Boundary
_PickedSet34, PINNED
** Name: BC-symm-bullet-target Type:  对称/反对称/完全固定
*Boundary
_PickedSet33, YSYMM
**
```

再次单击按钮，弹出图 14-119 所示的“创建边界条件”对话框，选择“力学”类别下的“对称/反对称/完全固定”类型，单击“继续”，选择图 14-120 所示的面。



图 14-119 “创建边界条件”对话框

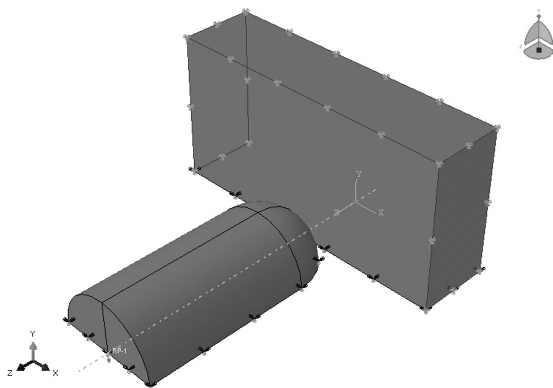


图 14-120 对称约束面

单击中键，弹出图 14-121 所示的“编辑边界条件”对话框，选择“铰接（U1=U2=U3=0）”。

（8）执行“预定义场（Predefined Field）→创建（Create）”命令，或者单击工具箱中的“创建预定义场”（Create Predefined Field），在弹出的图 14-122 所示的“创建预定义场”（Create Predefined Field）对话框中输入名称。



图 14-121 “编辑边界条件”对话框

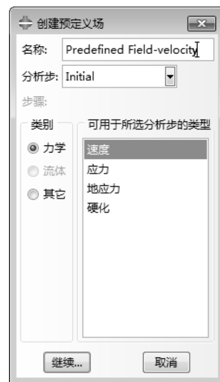


图 14-122 “创建预定义场”对话框

“分析步”选择初始步“Initial”，“类别”选择“力学”，可用于所选分析步的“类型”选择“速度”，单击“继续”按钮，在图形窗口选择部件 Part-bullet 上的 RP-1 参考点，单击“完成”按钮，进入“编辑预定义场”（Edit Predefined Field）对话框。

如图 14-123 所示，选择“仅平动”（Translational only），输入 V1 为“0”，V2 为“-684”，V3 为“-1879.4”。

单击“确定”按钮，完成部件 Part-bullet 速度场的定义，速度场方向如图 14-124 所示。

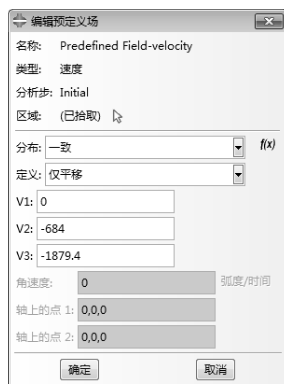


图 14-123 “编辑预定义场”对话框

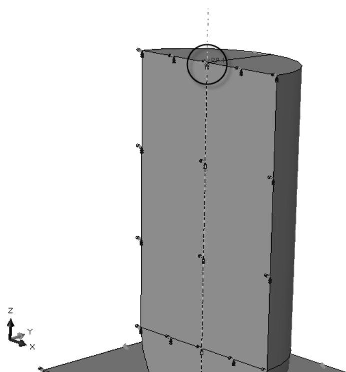


图 14-124 速度场方向

也可以采用如下命令，定义初始分析步的速度。

```
**
** PREDEFINED FIELDS
**
** Name: Predefined Field-velocity      Type: Velocity
*Initial Conditions, type=VELOCITY
_PickedSet32, 1, 0.
_PickedSet32, 2, -684.
_PickedSet32, 3, -1879.4
**
```

（9）进入“作业”模块，创建一个分析作业，如图 14-125 所示，定义作业的描述与分析类型。然后进入“并行”选项卡，按图 14-126 设置，根据计算平台的逻辑线程数定义调用的计算核心。

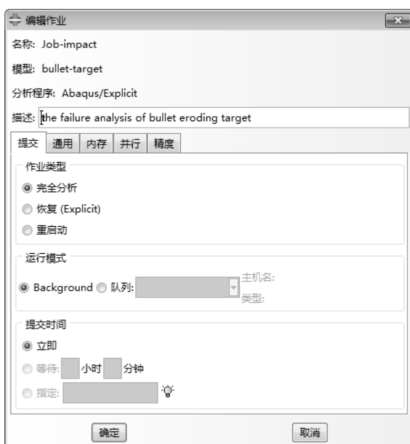


图 14-125 “编辑作业”对话框

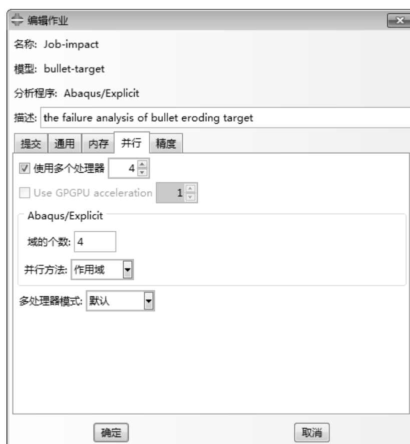


图 14-126 管理 CPU 的调用

完成定义以后即可提交计算。

本例提供完整 INP 文件，请参阅光盘文件。

（10）完成计算后，进入“可视化”模块，开始后处理。

图 14-127～图 14-132 所示的过程，清晰地反映了弹头侵彻的过程。

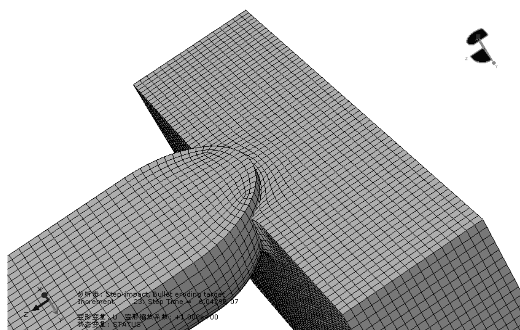


图 14-127　STEP=1 变形图

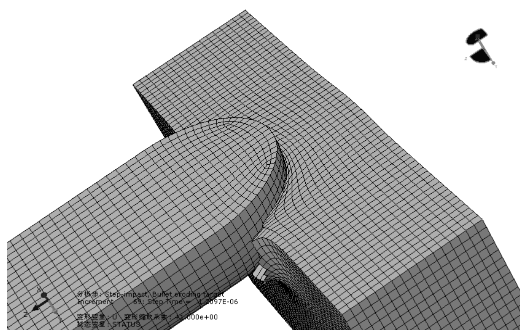


图 14-128　STEP=2 变形图

图 14-127 为刚刚开始侵入，图 14-128 表示已进入一半靶体，图 14-129 中靶的背面已凸起，到图 14-130 子弹已穿透靶体。

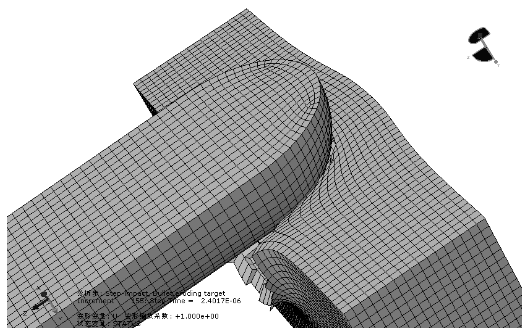


图 14-129　STEP=4 变形图

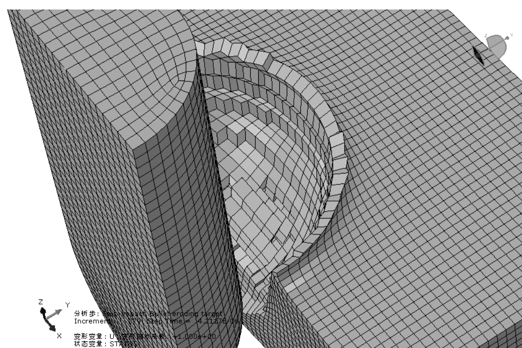


图 14-130　STEP=7 变形图

图 14-131 中可以明显看到材料在冲击下边缘的凸起，图 14-132 中子弹已完全穿过，可以看到材料的破裂。

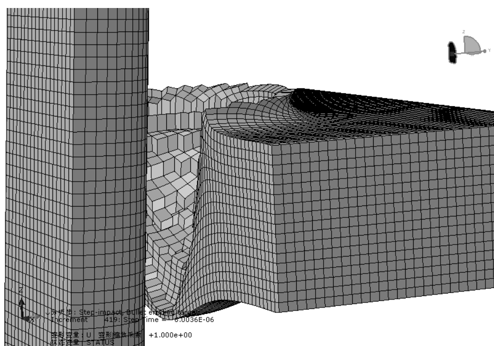


图 14-131　STEP=10 变形图

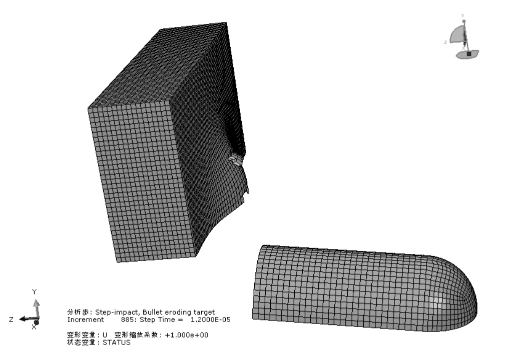


图 14-132　STEP=20 变形图

由于子弹是刚体，可以使用显示组管理器将子弹隐藏。图 14-133 所示为刚侵入时的应力分布云图，图 14-134 中应力迅速传播。

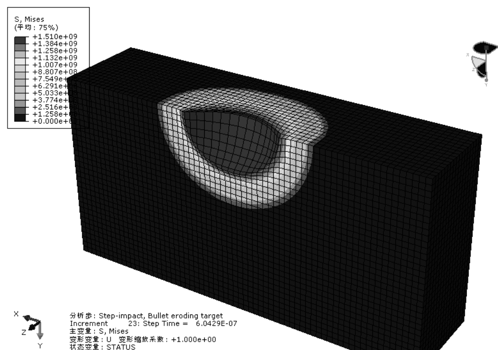


图 14-133　STEP=1 应力分布云图

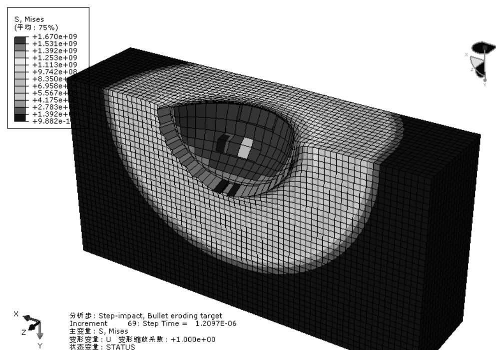


图 14-134　STEP=2 应力分布云图

图 14-135 中 800MPa 以上的应力迅速布满靶体，图 14-136 所示为 STEP=7 时应力分布。

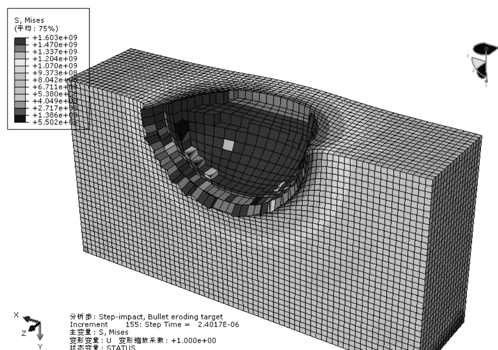


图 14-135　STEP=4 应力分布云图

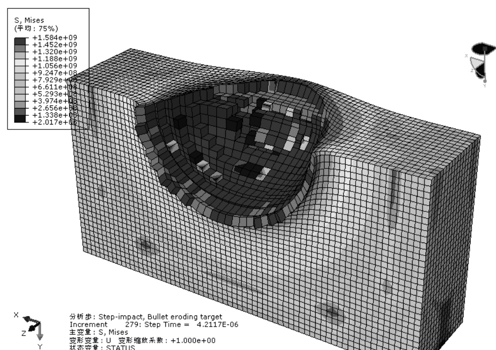


图 14-136　STEP=7 应力分布云图

图 14-137 为子弹穿出时靶体背面应力分布，图 14-138 为子弹完全通过靶体时的应力分布。

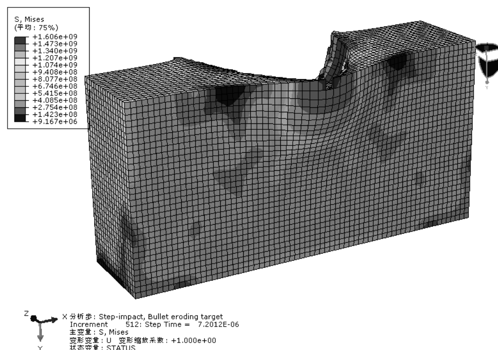


图 14-137　STEP=12 应力分布云图

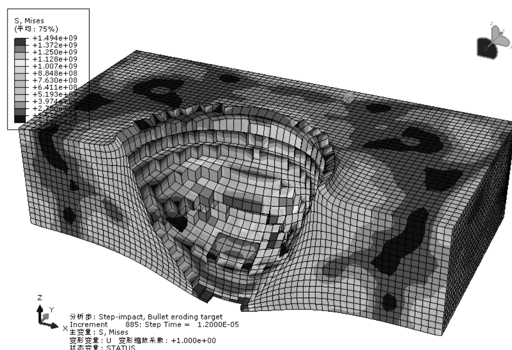
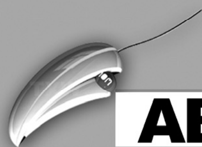


图 14-138　STEP=20 应力分布云图

执行“结果→历程输出”命令，弹出图 14-139 所示的“历程输出”对话框，分别选择



ALLWK、ALLIE、ALLKE、ETOTAL，绘制能量曲线，如图 14-140 所示为对外做功曲线，图 14-141 为模型总内能曲线，图 14-142 为模型总动能曲线，图 14-143 所示为模型的总能量曲线。

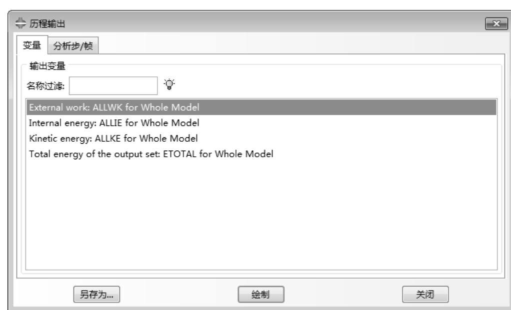


图 14-139 “历程输出”对话框

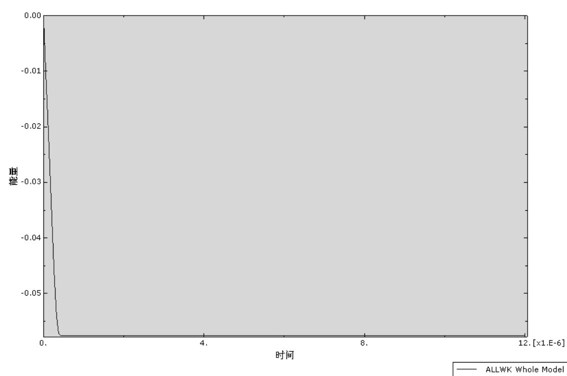


图 14-140 对外做功

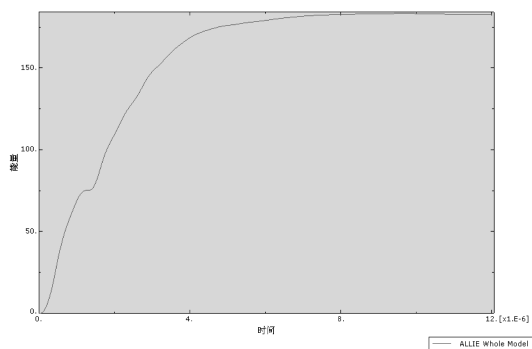


图 14-141 总内能曲线

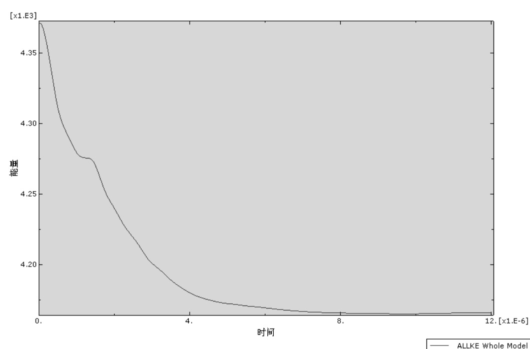


图 14-142 总动能曲线

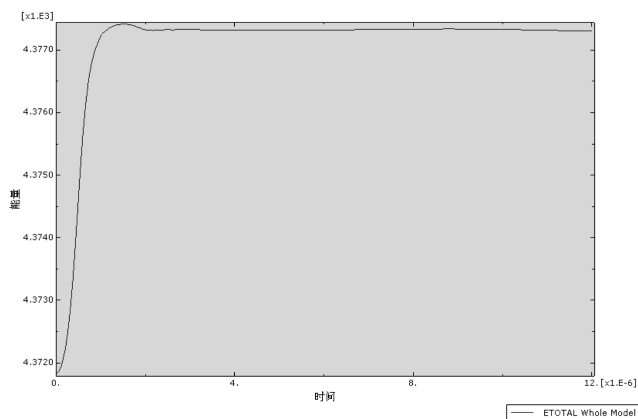


图 14-143 总能量曲线

单击按钮，弹出图 14-144 所示的“创建 XY 数据”对话框，创建一个“ODB 场变量输出”的 XY 数据，单击“继续”，在图 14-145 所示的“来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框中勾选要创建的数据类型。



图 14-144 “创建 XY 数据”对话框



图 14-145 “来自 ODB 场输出的 XY 数据”对话框

切换到图 14-146 所示的“单元/结点”选项卡，在视图区中选择一个单元（本例只为展示数据提取的方法，故具体哪一个单元可以自行选择），单击“确定”后，在图 14-147 所示的“XY 数据管理器”中可以看到创建的 XY 数据。



图 14-146 “单元/结点”选项卡页面

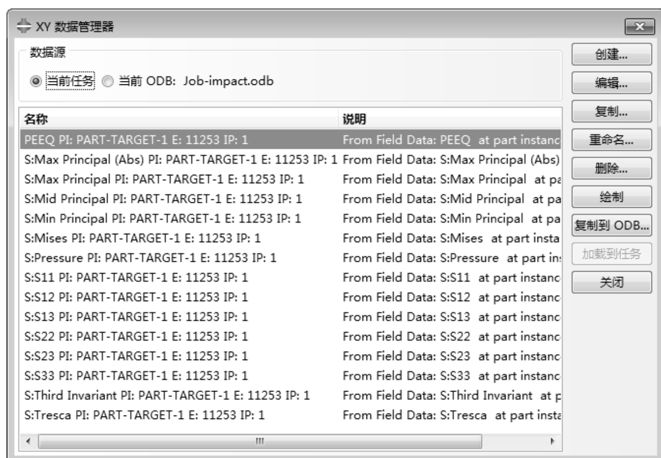
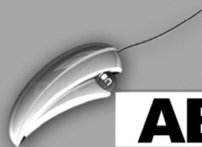


图 14-147 “XY 数据管理器”对话框

单击“绘制”按钮，可以绘制 XY 数据曲线。如图 14-148 所示为塑性应变能曲线，图 14-149 所示为积分点主应力曲线。



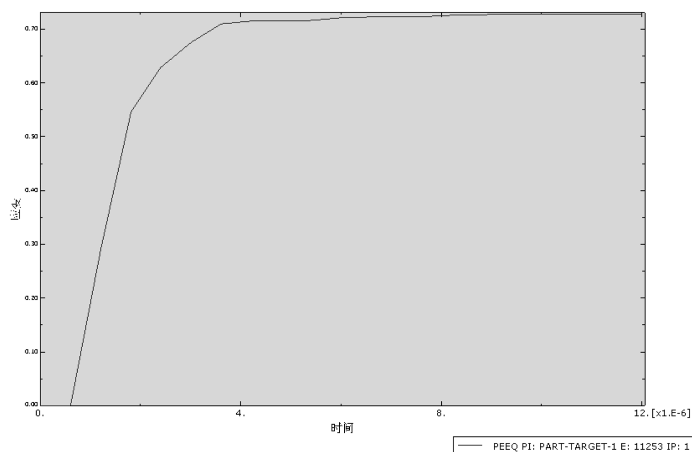


图 14-148　塑性应变能曲线

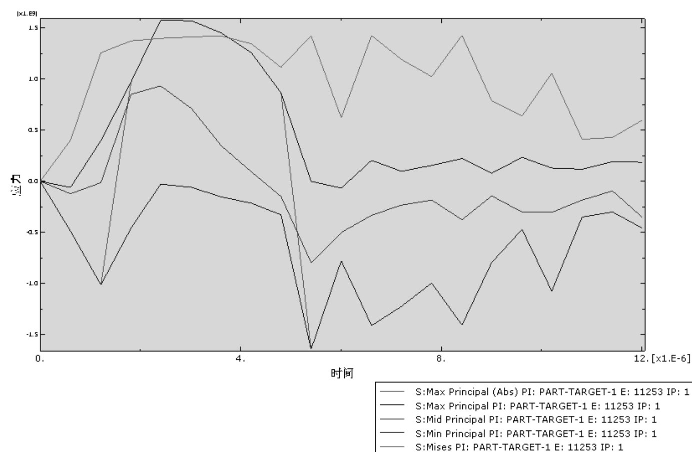


图 14-149　积分点主应力曲线

图 14-150 所示为应力不变量曲线，图 14-151 为三个方向的应力曲线。

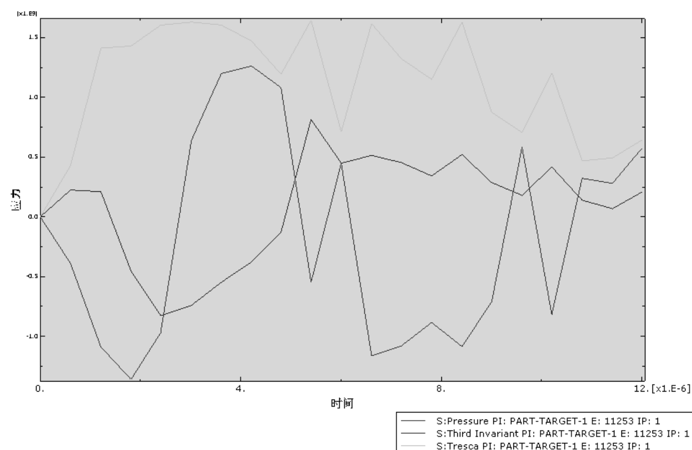


图 14-150　应力不变量曲线

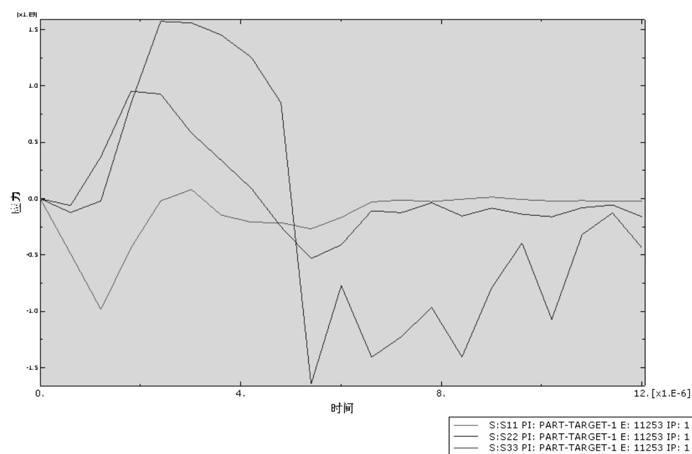


图 14-151　三个方向的应力曲线

图 14-152 为三个平面内的剪应力曲线，图 14-153 为 Mises 应力曲线。

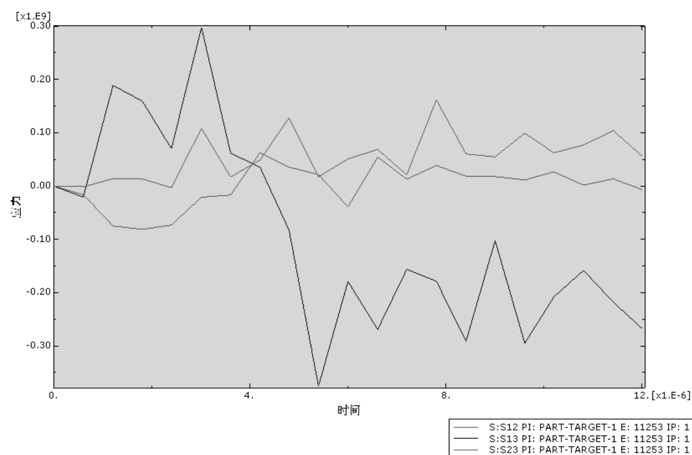


图 14-152　剪应力曲线

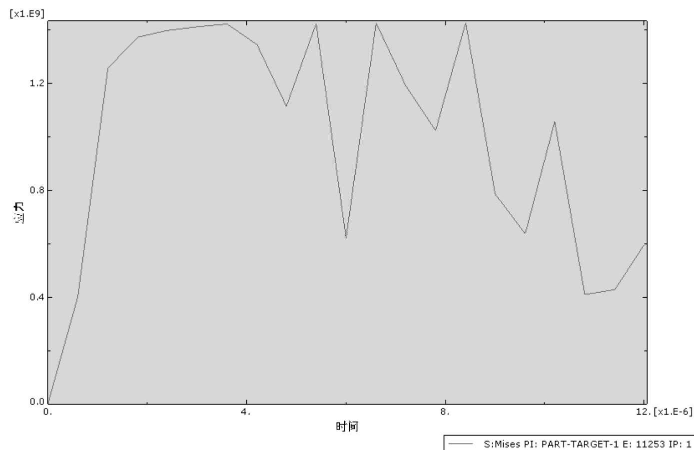


图 14-153　Mises 应力曲线

本例分析的目的是模拟在高度撞击载荷下材料失效的问题，在有限元分析领域中，模拟材料失效一直以来都是一个热点问题，也是模拟分析的难点之一。

材料失效本身在实际工程中就是一个很复杂的问题，也是实际工程分析的难点之一。由于实际中的各种材料多种多样，而其性能参数的测量也有一定的误差，再加上各种环境因素，这都增加了软件模拟分析的难度。

在 ABAQUS 软件中，模拟材料失效主要有两种方法。

一是使用已有的失效材料模型，在定义材料时指明相关的（例如最大拉伸应力或最大剪切应变等）失效准则，并给出相关的参数（本例就是采用这种方法来模拟分析模型的材料失效的）。

二是使用子程序 VUMAT，在该子程序中定义了一个状态变量（state variable）来表征材料是否失效，例如：为 0，表示失效；为 1，表示正常。然后根据自己定义的失效准则给这个变量赋值。子程序方法比较灵活，可以定义自己的失效准则和材料本构方程，因此运用 ABAQUS 软件模拟材料失效更多地采用这种方法。

14.3 本章小结

显式动态分析（ABAQUS/Explicit）是 ABAQUS 能够在众多的有限元分析工具中显得出类拔萃的重要模块。

显式动态分析在高速动力学事件、复杂接触问题、复杂的后屈曲问题、高度非线性的准静态问题、材料退化和失效等问题中占有重要地位。因为通常在这些问题中，使用隐式（ABAQUS/Standard）解法会难以收敛。

显式解法需要非常小的时间步，它仅依赖于模型的最高固有频率，而与载荷的类型和持续时间无关。通常模拟会取 10^4～10^6 个增量步，每个增量步的时间成本不高。

隐式解法对时间增量步的大小没有限制，增量的大小通常取决于精度与收敛特性。典型的隐式解法所采用的增量步数目要比显式解法小几个数量级。然而，由于每个增量步中都要求求解一套全域的方程组，所以对每一增量步的计算成本，隐式的解法要远远高于显式解法。



第 15 章　热　分　析

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度及热流密度（热通量）等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统及电子元件等。

ABAQUS 中可以进行热电耦合、热力耦合等多种耦合场分析，本章将结合实例讲解温度场求解方法及热应力分析，关于热电耦合，读者可以参阅 ABAQUS 用户手册相关章节。

本章学习目标

- 掌握热力学分析的基本概念
- 掌握相关的热力学基础知识
- 掌握热力学瞬态分析的方法
- 掌握热应力求解的方法

15.1　热力学基础知识

15.1.1　符号与单位

表 15-1 所示为热分析所涉及的单位制。

表 15-1　热分析单位制

项　　目	国 际 单 位	英 制 单 位
长度	m	ft
时间	s	s
质量	kg	lb
温度	°C	°F
力	N	lbf
能量（热量）	J	Btu
功率（热流率）	W	Btu/s
热流密度	W/m^2	Btu/（s·ft^2）
生热速率	W/m^3	Btu/（s·ft^3）
导热系数	W/（m·°C）	Btu/（s·ft·°F）
对流系数	W/（m^2·°C）	Btu/（s·ft^2·°F）
密度	kg/m^3	lbm/ft^3
比热	J/kg·°C	Btu/（lbm·°F）
焓	J/m^3	Btu/ft^3

15.1.2 热分析相关基础知识

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律。

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）：

$$Q-W=\Delta U+\Delta KE+\Delta PE \quad (15\text{-}1)$$

式中　Q——热量；

W——做功；

ΔU——系统内能；

ΔKE——系统动能；

ΔPE——系统势能。

对于大多数工程传热问题：ΔKE=ΔPE=0；

通常考虑没有做功：W=0，则：Q=ΔU；

对于稳态热分析：Q=ΔU=0，即流入系统的热量等于流出的热量；

对于瞬态热分析：$q=\dfrac{dU}{dt}$，即流入或流出的热传递速率等于系统内能的变化。

● 热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅立叶定律：

$$q''=-k\frac{dT}{dx} \quad (15\text{-}2)$$

式中　q″——热流密度（W/m^2）；

k——导热系数（W/(m-℃)）；

“-”——热量流向温度降低的方向。

● 热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述：

$$q''=h(T_s-T_B) \quad (15\text{-}3)$$

式中　h——对流换热系数（或称为膜传热系数、给热系数、膜系数等）；

T_s——固体表面的温度；

T_B——周围流体的温度。

● 热辐射

热辐射是指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬—波尔兹曼方程来计算：

$$q=\varepsilon\sigma A_1F_{12}(T_1^4-T_2^4) \quad (15\text{-}4)$$

式中　q——热流率；

ε——辐射率（黑度）；

σ——斯蒂芬－波尔兹曼常数，约为 $5.67\times10^{-8}W/m^2\cdot K^4$；

A_1——辐射面 1 的面积；

F_{12}——由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；

T_1——辐射面 1 的绝对温度；

T_2——辐射面 2 的绝对温度。由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

● 稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量：$q_{流入}+q_{生成}-q_{流出}=0$，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一结点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）：

$$[K]\{T\}=\{Q\} \tag{15-5}$$

式中 [K]——传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

[T]——结点温度向量；

[Q]——结点热流率向量，包含热生成。

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成[K]、[T]以及[Q]。

● 瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为（以矩阵形式表示）：

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=\{Q\} \tag{15-6}$$

式中 [K]——传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；

[C]——比热矩阵，考虑系统内能的增加；

{T}——结点温度向量；

$\{\dot{T}\}$——温度对时间的导数；

{Q}——结点热流率向量，包含热生成。

如果有下列情况产生，则为非线性热分析：

- 材料热性能随温度变化，如 K(T)、C(T)等；
- 边界条件随温度变化，如 h(T)等；
- 含有非线性单元；
- 考虑辐射传热。

非线性热分析的热平衡矩阵方程为：

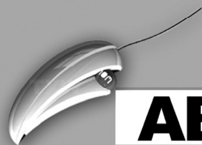
$$[C(T)]\{\dot{T}\}+[K(T)]\{T\}=\{Q(T)\} \tag{15-7}$$

式中各参数含义同式（15-6）。

ABAQUS 热分析的边界条件或初始条件可分为 7 种：温度、热流率、热流密度、对流、辐射、绝热和生热。

15.2 热分析实例

本节将介绍如何在 ABAQUS 中进行热力学分析。本节包含了温度场分析与热应力分



析求解的步骤，为读者讲解如何使用界面进行操作以及如何使用 INP 命令进行高级控制。

15.2.1 ABAQUS 瞬态热分析——金属散热管的温度场研究

图 15-1 所示的轴对称金属散热管，材料为不锈钢，EX=1.93E9，ν=0.3，导热系数为 25.96，管内流体温度为 250，对流系数为 249.23，空气温度 39，对流系数为 62.3，求其温度场分布。

由于散热管较长，可以看做平面模型，截面是轴对称结构，根据上述特点，可以采用图 15-2 所示的简化模型，上下边界为对称约束，管道内部受均布压力。

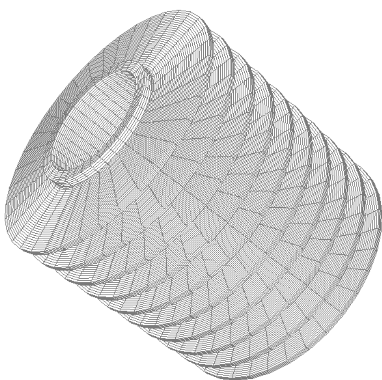


图 15-1 模型示意图

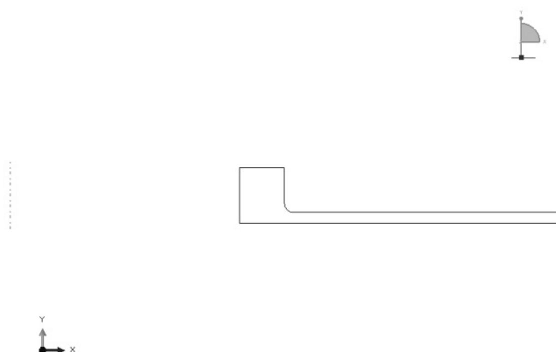


图 15-2 实用计算模型

（1）启动 ABAQUS/CAE，接下来开始创建模型。进入“部件”模块，单击按钮，弹出图 15-3 所示的“创建部件”对话框，选择“轴对称”模型，“基本特征”是“壳”，“大约尺寸”为“1”，单击“继续”，进入草图。

在草图界面绘制如图 15-4 所示的截面草图，单击两次中键退出，生成如图 15-5 所示的部件。



图 15-3 “创建部件”对话框

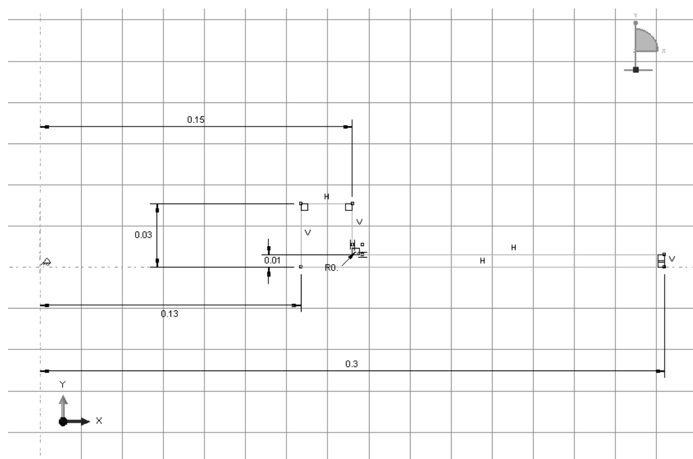


图 15-4 部件草图

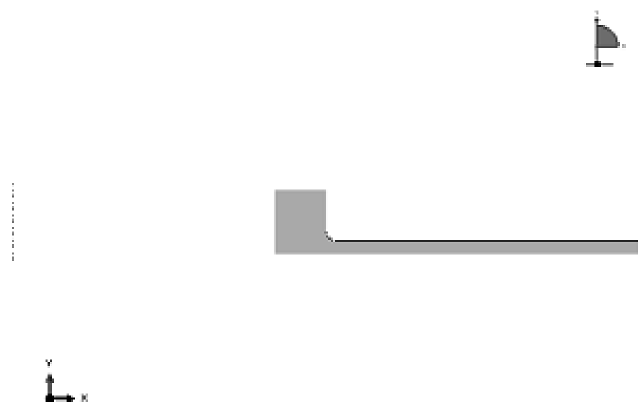


图 15-5　创建部件

此处为读者介绍另一种使用命令创建部件的方法，在“部件”模块中，只需要先进行声明，结点与单元可以编写在装配中，命令如下。

```
*Heading
** Job name: Cooling-Bar Model name: Cooling-Bar
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
**开始创建部件
** PARTS
**
*Part, name=Cooling-Bar
*End Part
**
```

（2）进入“属性”模块，单击按钮创建一个名为“Steel”的材料，如图 15-6 所示，添加传导率、密度、弹性、比热四个材料行为。如图 15-7 所示为传导率的设置。



图 15-6 “编辑材料”对话框



图 15-7　传导率设置

如图 15-8 所示为材料的弹性行为设置，图 15-9 所示为材料的比热设置。

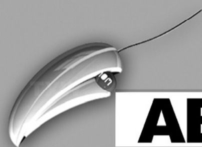




图 15-8　弹性行为设置



图 15-9　比热设置

材料的密度设置如图 15-10 所示。

单击按钮，弹出“创建截面”对话框，创建一个均质实体截面，单击“继续”弹出图 15-11 所示的“编辑截面”对话框，选择“Steel”材料，单击“确定”完成。



图 15-10　密度设置



图 15-11　“编辑截面”对话框

此时可以使用命令进行材料定义。

```
** MATERIALS
**创建材料
**
*Material, name=Steel
*Conductivity
 25.96,
*Density
7800.,
*Elastic
 1.93e+11, 0.3
*Specific Heat
451.,
** ----------------------------------------------------------------
```

完成截面创建后，单击按钮，将截面指派给第（1）步创建的部件，完成指派后如

图 15-12 所示。

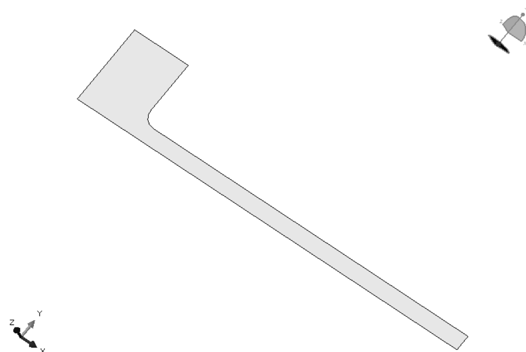


图 15-12　完成截面指派

（3）进入“装配”模块，单击按钮，弹出图 15-13 所示的“创建实例”对话框，将部件实例化如图 15-14 所示。



图 15-13　“创建实例”对话框

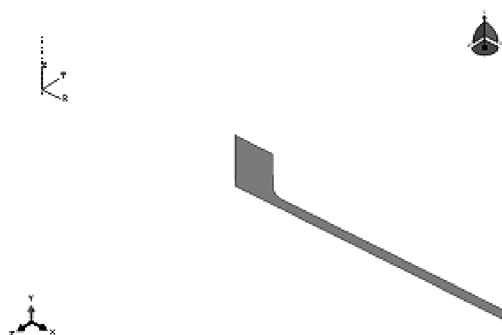


图 15-14　部件实例化

在本例命令中，此时才进行截面定义的，以下命令是写在 Assembly 中的。

```
*Nset, nset=_PickedSet4, internal, generate
    1,   145,      1
*Elset, elset=_PickedSet4, internal, generate
    1,   101,      1
** Region: (Section-1:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet4, internal, generate
    1,   101,      1
** Section: Section-1
*Solid Section, elset=_PickedSet4, material=Steel
1.,
*End Instance
```

（4）在装配中，还要定义用于设置边界条件的集，如下所示。

```
**
**创建用于定义边界条件的集
**
*Nset, nset=_PickedSet18, internal, instance=Cooling-Bar-1
  2,  3,  6, 15, 16, 26, 27, 28
*Elset, elset=_PickedSet18, internal, instance=Cooling-Bar-1
  3,  6,  9, 18, 19, 20, 21
*Nset, nset=_PickedSet25, internal, instance=Cooling-Bar-1
  7,  9, 10, 11, 12, 29, 30, 36, 37, 38, 69, 70, 71, 72, 73, 74
 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90
 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97
*Elset, elset=_PickedSet25, internal, instance=Cooling-Bar-1
  22,  23,  31,  40,  41,  42,  43,  44,  46,  48,  50,  52,  54,  56,  58,  60
  62,  64,  66,  68,  70,  72,  74,  76,  78,  80,  82,  84,  86,  88,  90,  92
  94,  96,  98, 100, 101
*End Assembly
**
```

（5）进入“分析步”模块，单击按钮，弹出图 15-15 所示“创建分析步”对话框，创建一个“热传导”分析步，单击“继续”，弹出图 15-16 所示的“编辑分析步”对话框，选择“瞬态”热分析，定义“时间长度”为“2.5”。



图 15-15 “创建分析步”对话框

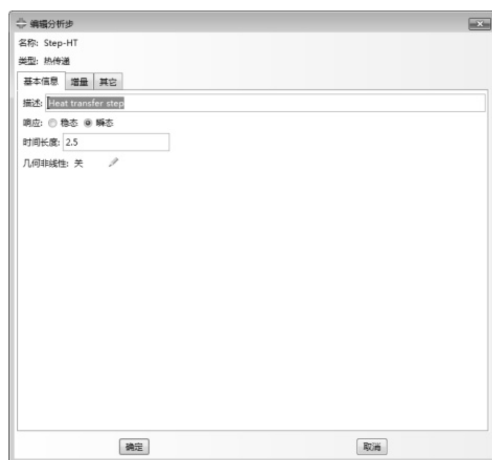


图 15-16 “编辑分析步”对话框

切换到“增量”选项卡，按图 15-17 进行设置。

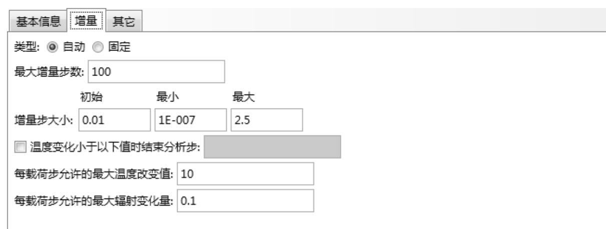


图 15-17 “增量”选项卡

只需要使用如下命令即可创建分析步。

```
**
** STEP: Step-HT
**
*Step, name=Step-HT
Heat transfer step
*Heat Transfer, end=PERIOD, deltmx=10.
0.01, 2.5, 1e-07, 2.5,
**
```

（6）进入“载荷”模块，单击按钮，创建温度边界条件如图 15-18 所示，单击“继续”，拾取图 15-19 所示的边，单击中键。



图 15-18 “创建边界条件”对话框

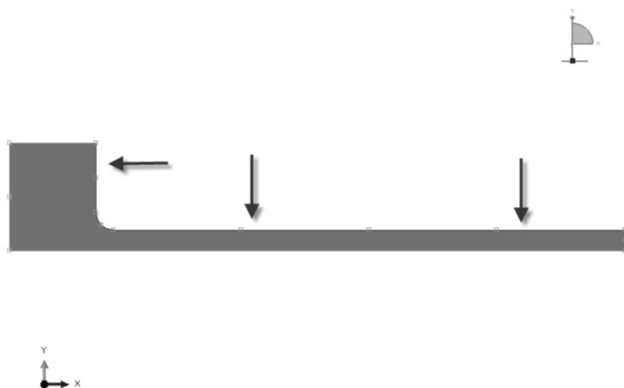


图 15-19 边界施加位置

弹出图 15-20 所示的“编辑边界条件”对话框，设置“大小”为“20”，单击“确定”退出。重复上述操作，为图 15-21 所示的边施加大小为 250 的温度边界。



图 15-20 “编辑边界条件”对话框

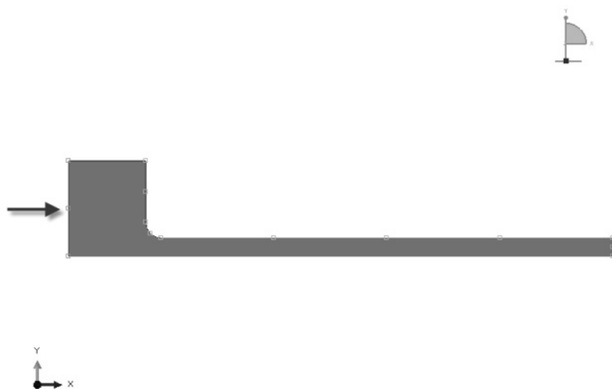


图 15-21 边界条件的位置

在命令中，可以在 STEP 块中插入如下命令进行定义。

```
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**定义边界条件
**
** Name: BC-1 Type: Temperature
*Boundary
_PickedSet25, 11, 11, 20.
** Name: BC-2 Type: Temperature
*Boundary
_PickedSet18, 11, 11, 250.
**
```

（7）进入“网格”模块，单击按钮，弹出图 15-22 所示的“全局种子”对话框，输入“近似全局尺寸”为“0.005”，单击“确定”完成布种，如图 15-23 所示。



图 15-22 “全局种子”对话框

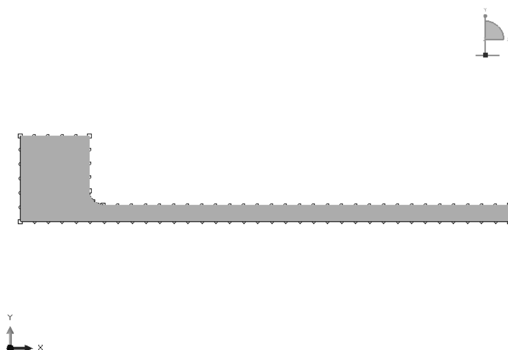


图 15-23 布种

单击按钮，弹出图 15-24 所示的“单元类型”对话框，定义单元类型为 DCAX4（四结点线性轴对称传热四边形单元），单击“确定”，再单击按钮，完成网格划分如图 15-25 所示。

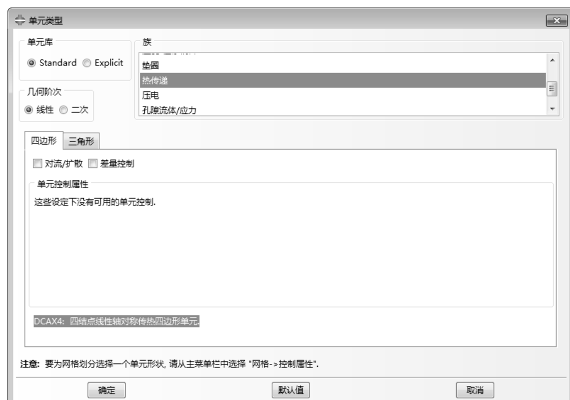


图 15-24 “单元类型”对话框

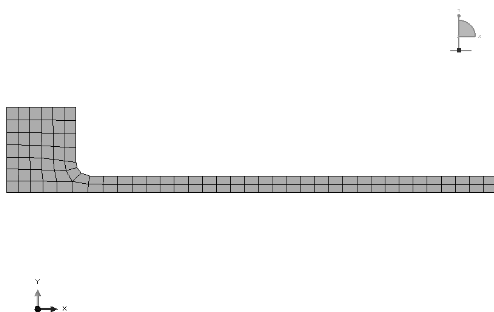


图 15-25 划分完成

（8）单击按钮，创建一个分析作业，在图 15-26 所示的“并行”选项卡中，参考所用的计算平台的运算能力，选择调用的核心数，单击“确定”即可以在图 15-27 所示的“作业管理器”中提交计算。

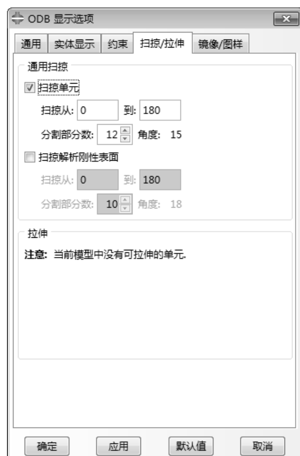




图 15-26 “编辑作业”对话框　　　　图 15-27 “作业管理器”对话框

本例模型几何形状简单，可以直接用 INP 文件建模设置导入开始计算。光盘中提供了完整的 INP 文件，供读者参考。

（9）完成计算即可进行后处理，进入“可视化”模块。执行“视图→ODB 显示选项”命令，弹出图 15-28 所示的“ODB 显示选项”对话框，输入旋转角度，将模型扩展为图 15-29 所示的模型。



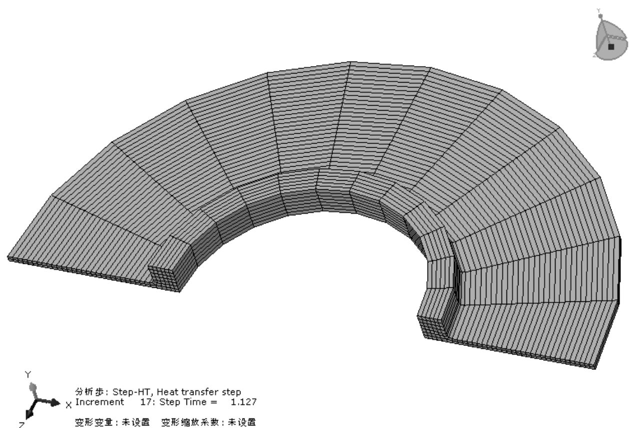


图 15-28 “ODB 显示选项”对话框　　　　图 15-29 扩展模型

在图 15-30 所示的“镜像/图样”选项卡中，勾选“XZ”镜像平面，使模型镜像为图 15-31 所示模型。

在“镜像/图样”选项卡的模式中按图 15-32 进行设置输入 Y 方向阵列数目“5”，“偏移”为“0.062”，单击“确定”，完成一段散热管的模型如图 15-33 所示。



图 15-30 镜像设置

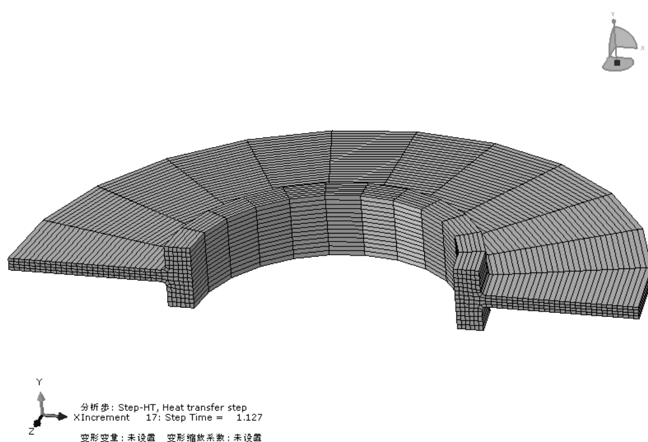


图 15-31 模型镜像



图 15-32 模式设置

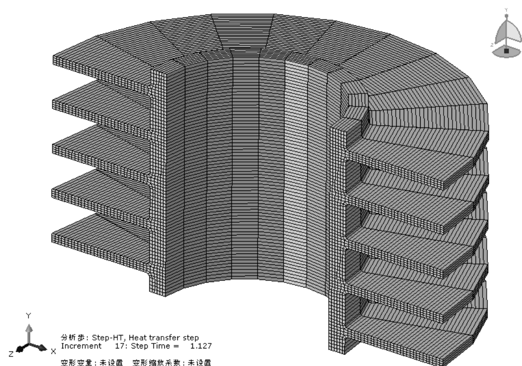


图 15-33 完成散热管模型

单击按钮，选择变量为 HFL，显示热流量合矢量云图如图 15-34 所示。图 15-35 为 STEP=10 时的热流量合矢量云图。

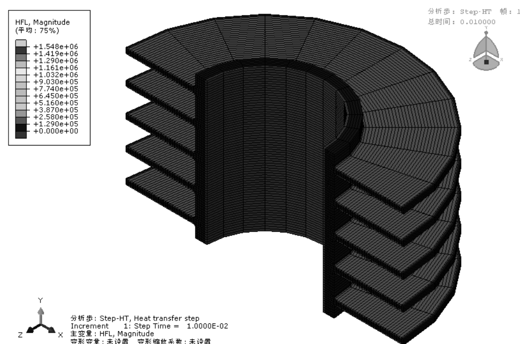


图 15-34 STEP=1，HFL（热流量合矢量）

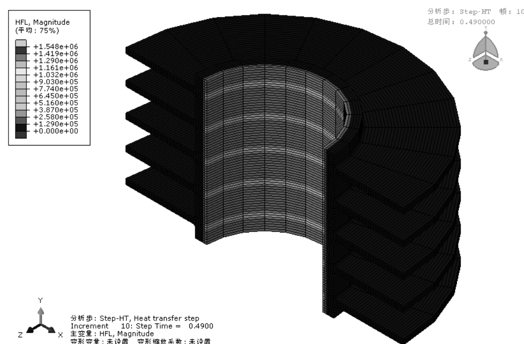


图 15-35 STEP=10，HFL（热流量合矢量）

图 15-36 为 STEP=15 时的热流量合矢量云图。图 15-37 为 STEP=26 时的热流量合矢量云图。

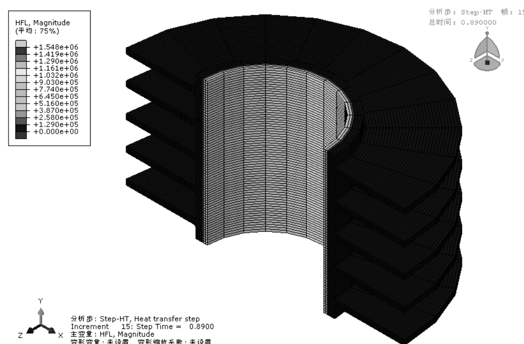


图 15-36 STEP=15，HFL（热流量合矢量）

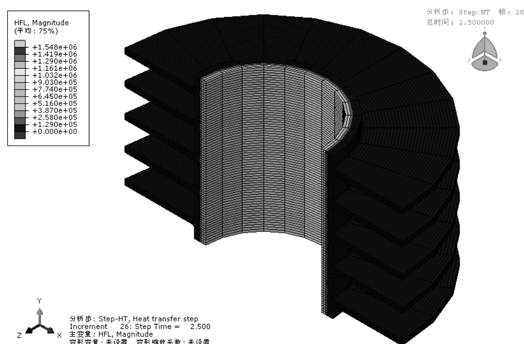


图 15-37 STEP=26，HFL（热流量合矢量）

选择变量为 HFL（HFL1），显示热流量分矢量云图如图 15-38 所示。图 15-39 为 STEP=10 时的热流量分矢量云图。

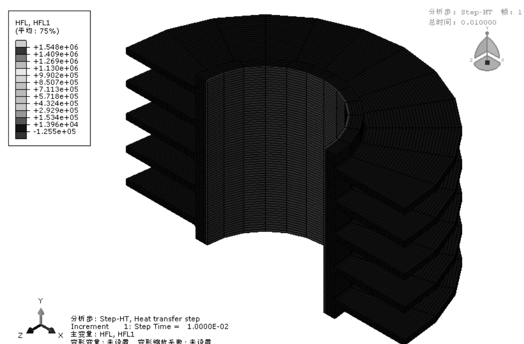


图 15-38 STEP=1，HFL1（热流量分矢量）

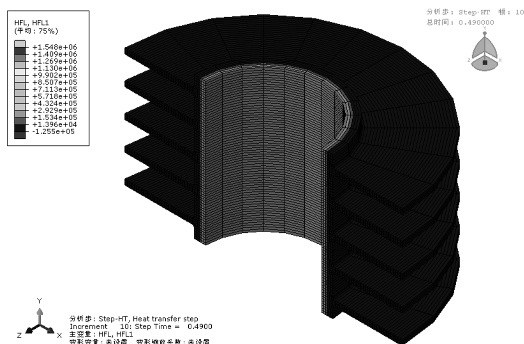


图 15-39 STEP=10，HFL1（热流量分矢量）

图 15-40 为 STEP=15 时的热流量分矢量云图。图 15-41 为 STEP=26 时的热流量分矢量云图。

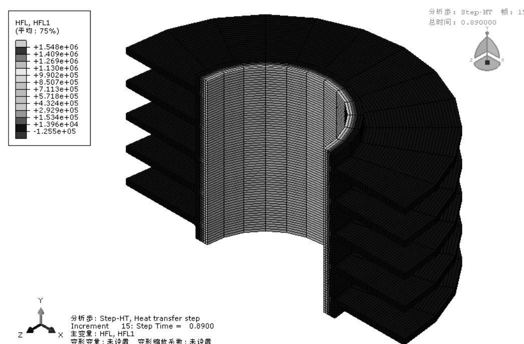


图 15-40 STEP=15，HFL1（热流量分矢量）

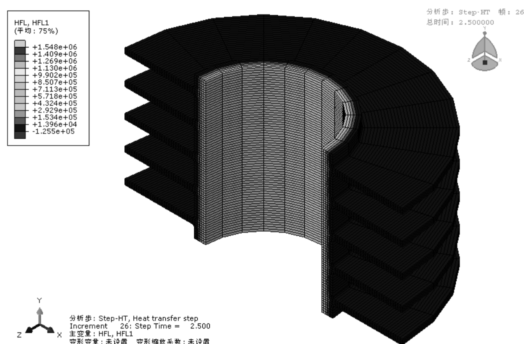


图 15-41 STEP=26，HFL1（热流量分矢量）

选择变量为 HFL（HFL2），显示热流量分矢量云图如图 15-42 所示。图 15-43 为 STEP=10 时的热流量分矢量云图。

图 15-44 为 STEP=15 时的热流量分矢量云图。图 15-45 为 STEP=26 时的热流量分矢量云图。

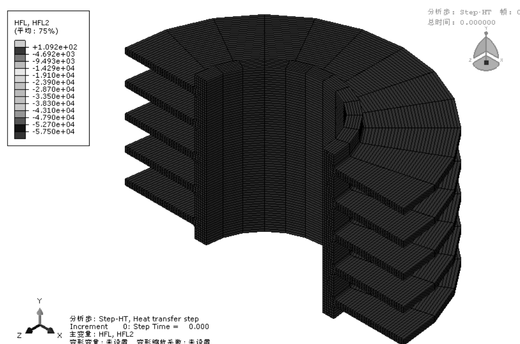


图 15-42 STEP=1，HFL2（热流量分矢量）

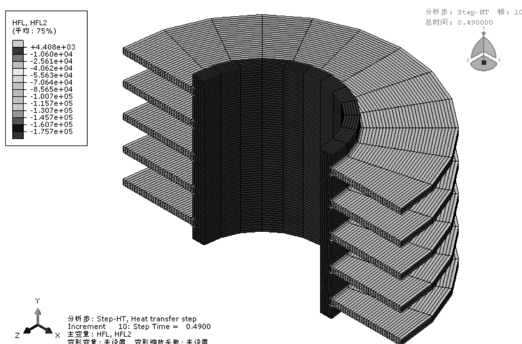


图 15-43 STEP=10，HFL2（热流量分矢量）

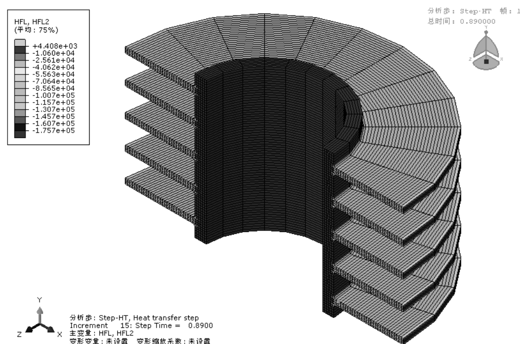


图 15-44 STEP=15，HFL2（热流量分矢量）

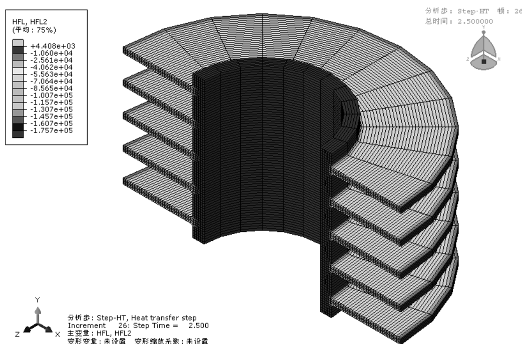


图 15-45 STEP=26，HFL2（热流量分矢量）

15.2.2 ABAQUS 热应力分析——刹车盘片的热效应

汽车刹车有盘刹（如图 15-46 所示）和鼓刹，因为盘刹较鼓刹的散热好，在高速制动状态下，不容易产生热衰退，所以其高速制动效果好。但在低速冷闸时，制动效果不如鼓刹，且价格比鼓刹贵。所以很多中高级轿车采用全盘刹，而普通轿车采用前盘后鼓，而相对低速，且需要制动力大的卡车、巴士，仍采用鼓刹。



图 15-46 刹车盘

图 15-46 所示的刹车盘，材料为钢，外径为 135mm，内径为 90mm，厚度为 6mm。盘片基座上的圆环外径为 135mm，内径为 100mm，厚度为 2mm，材料为钢。盘片为树脂加强的复合，可以用来提高摩擦效果，外径为 133mm，内径为 101.5mm，厚度为 10mm，圆心角为 30°。摩擦系数和材料性能随温度变化，见表 15-2 与表 15-3。

表 15-2 材料温度与摩擦系数的关系

温度/℃	20	100	200	300	400
摩擦系数	0.37	0.38	0.41	0.39	0.24

表 15-3 材料弹性模量与热膨胀系数

温度/℃	20	100	200	300
弹性模量/Pa	2.20E+09	1.30E+09	5.30E+08	3.20E+08
热膨胀系数/K^{-1}	1.00E-05		3.00E-05	

考虑刹车盘与刹车片之间的摩擦生热现象以及热传导过程，并且分析由于热产生的应力，在分析过程中刹车盘与刹车片存在着接触摩擦关系，所以需定义两个分析步：第一个分析步中对刹车片施加压力，使刹车片与刹车盘建立稳定的接触关系；在第二个分析步中使用刹车盘旋转 60°。

两个分析步均使用动力学显式热应力耦合分析步。单元类型选择热应力耦合单元 C3D8RT。

（1）创建部件。

进入“部件”模块，单击按钮创建部件。如图 15-47 所示，创建的是拉伸三维可变形实体，“大约尺寸”为“0.25”，单击“继续”进入草图，绘制图 15-48 所示的草图。



图 15-47 “创建部件”对话框

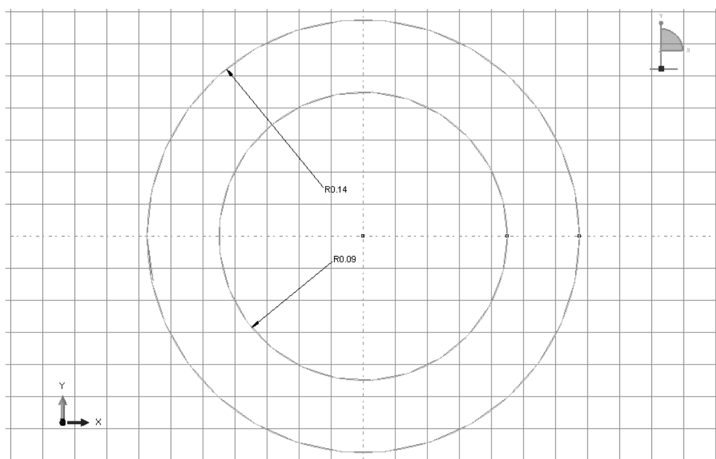


图 15-48 草图

连续单击中键，直到弹出图 15-49 所示的“编辑基本拉伸”对话框，输入“深度”为“0.003”，单击“确定”，完成 Dowm-disk 部件如图 15-50 所示。



图 15-49 “编辑基本拉伸”对话框

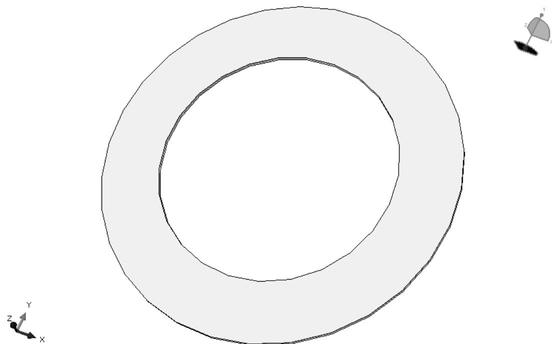


图 15-50 Down-disk 部件

重复上述操作，创建另外两个部件。图 15-51 所示的 Pad 部件草图拉伸 0.01 得到图 15-52 所示的 Pad 部件。

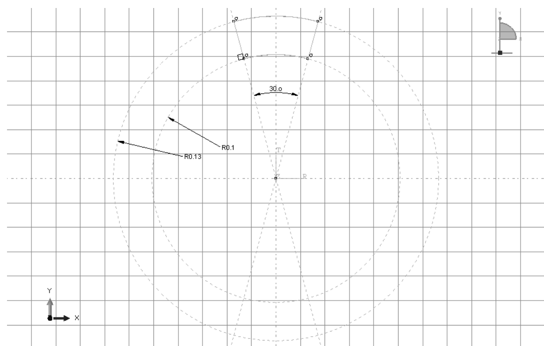


图 15-51　Pad 部件草图

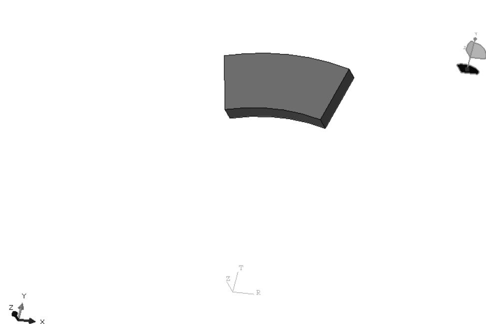


图 15-52　Pad 部件

图 15-53 所示的 Up-disk 部件草图拉伸 0.002 得到图 15-54 所示的 Up-disk 部件。

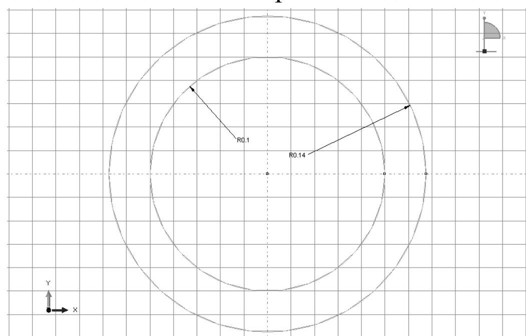


图 15-53　Up-disk 部件草图

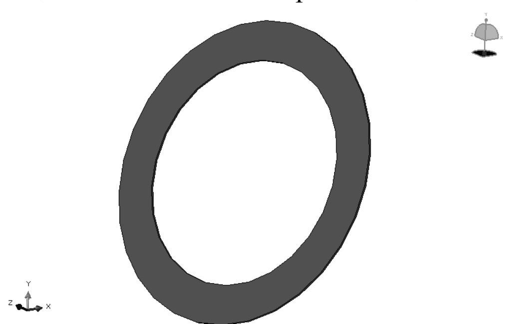


图 15-54　Up-disk 部件

（2）进入“装配”模块，将部件实例化如图 15-55 所示，部件之间发生干涉。使用按钮，将部件之间相对位置调整为图 15-56 所示。

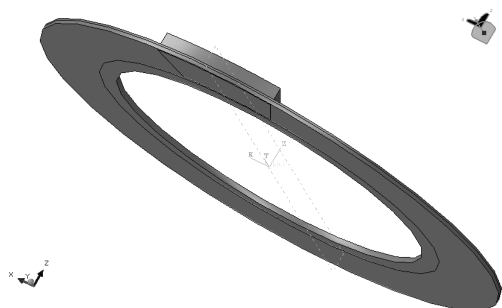


图 15-55　实例化

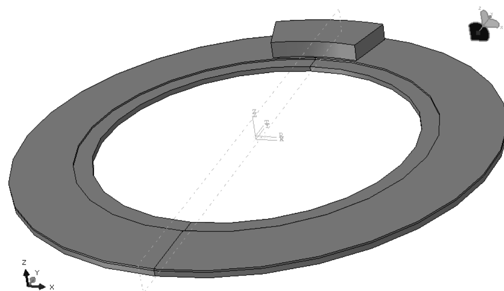


图 15-56　调整后相对位置

选中 Down-disk 与 Up-disk 部件，单击按钮，弹出图 15-57 所示的“合并/切割实体”对话框，选择保持原边界，单击“创建”，生成一个新的部件，得到图 15-58 所示的新部件。

本例在编写关键字时，直接以实例形式创建。部件代码块中的命令如下。

```
** PARTS
**
**Disk 部件是在装配中创建的，其单元及结点将在后面出现
**
*Part, name=Disk
*End Part
**
*Part, name=Pad
*End Part
**
**
```



图 15-57 “合并/切割实体”对话框

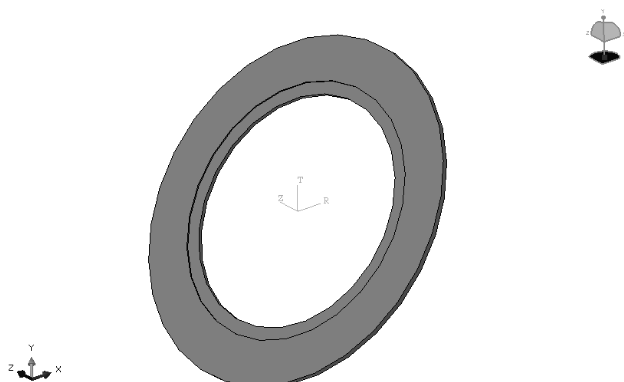


图 15-58 新部件

（3）进入“属性”模块，开始定义材料属性。单击按钮，在图 15-59 所示的“编辑材料”对话框中创建一个材料属性，定义传导率、密度、弹性、膨胀与比热这几个参数。图 15-60 所示为 pad-mat 材料的传导率设置。

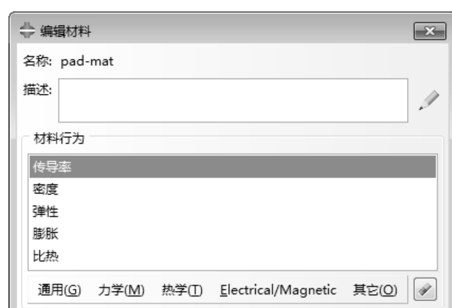


图 15-59 创建 pad-mat 材料



图 15-60 传导率设置

图 15-61 所示为弹性设置，图 15-62 所示为膨胀设置。两个参数都是与温度相关的参数。

弹性

类型: 各向同性 ▼ 子选项

☑ 使用与温度相关的数据

场变量个数: 0

模量时间尺度 (用于粘弹性): 长期

☐ 无压缩

☐ 无拉伸

数据

	杨氏模量	泊松比	温度
1	2200000000	0.25	20
2	1300000000	0.25	100
3	530000000	0.25	200
4	320000000	0.25	300

图 15-61　温度相关的弹性参数设置

膨胀

类型: 各向同性

☐ 使用用户子程序: UEXPAN

参考温度: 0

☑ 使用与温度相关的数据

场变量个数: 0

数据

	膨胀系数 alpha	温度
1	1E-005	20
2	3E-005	200

图 15-62　膨胀系数设置

图 15-63 所示为密度设置，图 15-64 为比热设置。注意这两者是与温度无关的参数。在此提醒，与温度相关是指这个参数本身随温度发生改变，比热是热力学参数，但其值不随温度发生改变，故在此与温度无关，请勿混淆。

密度

分布: 一致

☐ 使用与温度相关的数据

场变量个数: 0

数据

	质量密度
1	1550

图 15-63　密度设置

比热

类型: ◉ 常体积 ○ 常压强

☐ 使用与温度相关的数据

场变量个数: 0

数据

	比热
1	1200

图 15-64　比热设置

材料的创建使用命令更为方便，相应的命令如下。

```
** MATERIALS
**
**创建 pad-mat 材料
**
*Material, name=pad-mat
**
**传导率
**
*Conductivity
```

```
 0.9,
**
**密度
**
*Density
1550.,
**
**弹性模量和泊松比，与温度相关
**
*Elastic
 2.2e+09, 0.25,    20.
 1.3e+09, 0.25, 100.
 5.3e+08, 0.25, 200.
 3.2e+08, 0.25, 300.
**
**膨胀系数，与温度相关
**
*Expansion
 1e-05, 20.
 3e-05,200.
**
**比热
**
*Specific Heat
1200.,
**
```

再次单击按钮，在图 15-65 所示的对话框中创建 steel 材料属性。定义传导率、密度、弹性、膨胀与比热这几个参数。图 15-66 所示为 steel 材料的传导率设置。

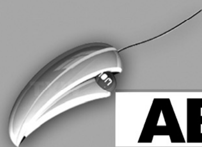


图 15-65　创建 steel 材料



图 15-66　传导率设置

图 15-67 所示为弹性设置，图 15-68 所示为膨胀设置。



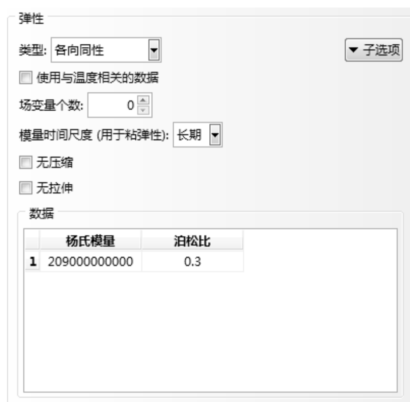


图 15-67　弹性参数设置



图 15-68　膨胀系数设置

图 15-69 所示为密度设置，图 15-70 为比热设置。



图 15-69　密度设置



图 15-70　比热设置

如下所示为 Steel 材料设置的命令。Steel 材料也是与温度相关的材料，每个参数逐次定义即可。

```
**Steel 材料
**
*Material, name=steel
**
**传导率
**
*Conductivity
48.,
**
**密度
**
*Density
7800.,
**
```

```
**弹性模量与泊松比
**
*Elastic
 2.09e+11, 0.3
*Expansion
 1.1e-05,
*Specific Heat
450.,
**
```

完成两个材料的创建后，再分别定义两个均质实体截面，对应这两个材料，最后单击按钮将截面指派。Steel 材料对应的截面指派给 Disk 部件，pad-mat 材料对应的截面指派给 Pad 部件。这一过程在前文中已多次介绍，不再赘述。

与界面操作不同的是，在本例的命令中，是在装配中进行如下截面的定义的。

```
** Section: Sec-pad
*Solid Section, elset=_PickedSet5, orientation=Ori-1, material=pad-mat
1.,
*End Instance
** Section: Sec-disk
**
*Solid Section, elset=_PickedSet3, orientation=Ori-1, material=steel
1.,
*End Instance
```

（4）进入“分析步”模块，单击按钮，弹出图 15-71 所示的“创建分析步”对话框，创建一个通用的显式的、温度-位移动力分析步，命名为“Apply-Pressure”。

单击“继续”，弹出图 15-72 所示的“编辑分析步”对话框。修改时间长度如图 15-72 所示。



图 15-71 “创建分析步”对话框

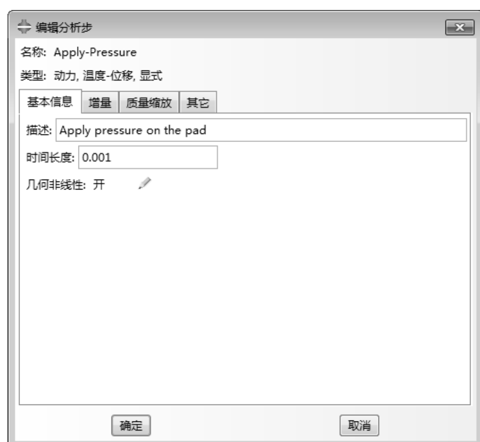


图 15-72 “编辑分析步”对话框

参考上述操作，再创建一个同一类型的分析步，名为“Rotation”，“时间长度”为“0.015”，

其他默认即可，单击“确定”完成。

可以使用命令直接创建分析步，更为方便。

```
** STEP: Apply-Pressure
**
*Step, name=Apply-Pressure
Apply pressure on the pad
**
**分析步类型为动力、温度位移耦合、显式
**
*Dynamic Temperature-displacement, Explicit
, 0.001
**
**线性体积粘性系数与二次体积粘性系数
**
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
**质量缩放因子
** Mass Scaling: Semi-Automatic
**              Whole Model
*Fixed Mass Scaling, factor=100.
**
** STEP: Rotation
**
*Step, name=Rotation
Rotation of the pad
**
**分析步类型为动力、温度位移耦合、显式
**
*Dynamic Temperature-displacement, Explicit
, 0.015
**
**体积粘性系数
**
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
**
**质量缩放因子
**
** Mass Scaling: Semi-Automatic
**              Whole Model
*Fixed Mass Scaling, factor=100.
**
```

（5）回到“装配”模块，在开始创建相互作用与加载前，需要定义一系列集。执行“工

具→集→创建”命令，在视图区中拾取图 15-73 所示的区域，将其几何特征创建为一个名为“DiskUpSurf”的集。

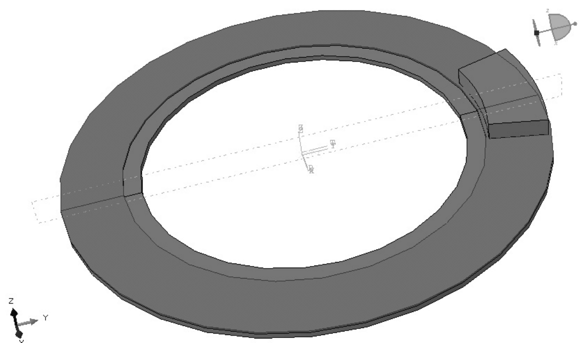


图 15-73　DiskUpSurf 集

执行“工具→表面→创建”命令，拾取图 15-74 所示的区域，创建一个名为“Surf-disk”的表面。重复操作，创建图 15-75 所示的“Surf-pad”表面

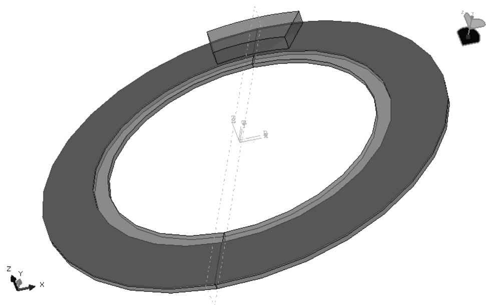


图 15-74　Surf-disk 表面

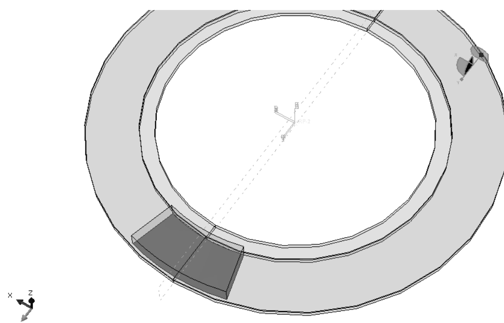


图 15-75　Surf-pad 表面

使用命令创建表面时，方式如下。

```
**创建 Surf-disk 表面
**
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-disk
_Surf-disk_S6, S6
_Surf-disk_S4, S4
*Orientation, name=Ori-1, system=CYLINDRICAL
0., 0., 0., 0., 0., 1. 3, 0.
** Region: (Sec-disk:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet3, internal, generate
   1,   400,      1
*Surface, type=ELEMENT, name=Surf-pad
_Surf-pad_S5, S5
*Orientation, name=Ori-1, system=CYLINDRICAL
```

0., 0., 0., 0., 0., 1. 3, 0.
** Region: (Sec-pad:Picked), (Material Orientation:Picked)
*Elset, elset=_PickedSet5, internal, generate
1, 48, 1

这样就创建了两个表面，使用 NSET 与 ELSET 命令可以用于创建集，格式如下。

```
*Nset, nset=DiskUpSurf, instance=Disk-1
  11,  12,  13,  16,  17,  22, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110
**将所有需要包含的结点号全部输入
*Elset, elset=DiskUpSurf, instance=Disk-1
21,  23,  25,  27,  29,  31,  33,  35,  37,  39,  41,  43,  45,  47,  49,  51
**将所有相关的单元编号全部输入
```

（6）进入“相互作用”模块，开始定义相互作用。

单击按钮，创建一个包含图 15-76 所示的多个参数的接触相互作用属性，按图 15-77 进行接触的切向行为设置。



图 15-76 “编辑接触属性”对话框

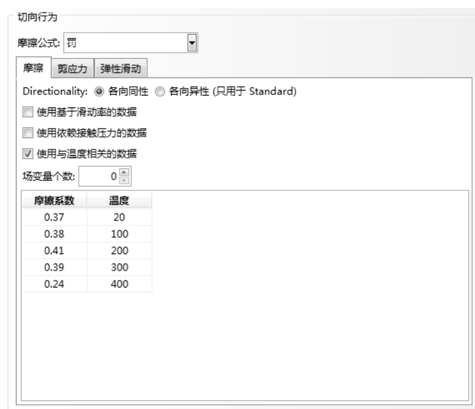


图 15-77 切向行为设置

图 15-78 所示为热传导的设置，图 15-79 所示为生热的设置。



图 15-78 热传导设置



图 15-79 生热设置

使用如下命令也可以进行定义相互作用属性，且更为简洁。

```
** INTERACTION PROPERTIES
**
**创建一个相互作用属性
**
*Surface Interaction, name=IntProp-fric
**
**与温度相关的摩擦系数
**
*Friction
 0.37, , , 20.
 0.38, , ,100.
 0.41, , ,200.
 0.39, , ,300.
 0.24, , ,400.
**
**热传导系数
**
*Gap Conductance, pressure
 5e+07,      0.
 5e+07,1000.
**
**生热率
**
*Gap Heat Generation
1., 0.5
**
```

单击按钮，弹出图 15-80 所示的“创建相互作用”对话框，选择“表面与表面接触（Explicit）”，单击“继续”。弹出“编辑相互作用”对话框。

在图 15-81 所示的“编辑相互作用”对话框中选择主表面与从表面，选择上一次创建的相互作用属性。单击“确定”退出完成编辑。

或者将如下所示的命令插入到相应的分析步中。

```
** INTERACTIONS
**
**定义接触
** Interaction: Contact-DiskPad
*Contact Pair, interaction=IntProp-fric, mechanical constraint=KINEMATIC, weight=0., cpset=Contact-DiskPad
Surf-pad, Surf-disk
**
**表面热交换属性
**
** Interaction: HT
```

```
*Sfilm, amplitude=RAMP
Surf-disk, F, 20., 100.
**
```



图 15-80 “创建相互作用”对话框



图 15-81 “编辑相互作用”对话框

再创建一个表面热交换条件类型的相互作用，在图 15-82 所示的“编辑相互作用”对话框中选择作用的“表面”为 Surf-disk 集，单击“环境温度的幅值”右边的按钮。

在弹出的“创建幅值”对话框中选择“表”，单击“继续”，弹出图 15-83 所示的“编辑幅值”对话框，设置见图 15-83。



图 15-82 “编辑相互作用”对话框



图 15-83 “编辑幅值”对话框

在“关键字编辑器”中，以下命令应放置于 STEP 块之前。

```
**
**创建 RAMP 幅值
**
*Amplitude, name=RAMP
0., 0., 0.001, 1.
*Amplitude, name=RAMP2, definition=SMOOTH STEP
0., 0., 0.015, 1.
**
```

完成设置后单击“确定”。

单击按钮，创建一个刚体约束，单击“继续”，弹出图 15-84 所示的“编辑约束”对话框，选择“铰接”，在视图区中拾取图 15-85 所示的部件分区，单击中键完成。



图 15-84 “编辑约束”对话框

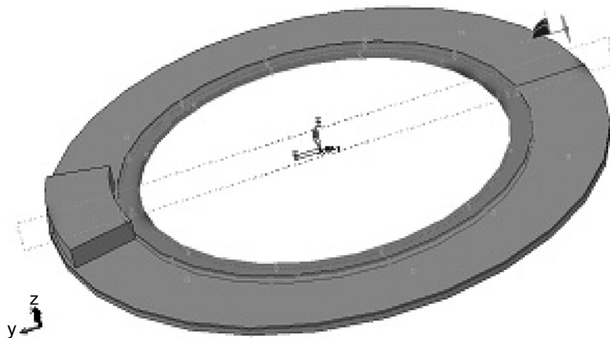


图 15-85 约束部分

刚体约束的关键字应当在进入分析步之前就开始定义。

```
** Constraint: RigidCons
*Rigid Body, ref node=_PickedSet71, pin nset=_PickedSet72
*End Assembly
**
```

（7）接下来开始加载。进入“载荷”模块。单击按钮，创建一个压强载荷，选择 Pad 部件的上表面作为加载面，单击中键，弹出图 15-86 所示的“编辑载荷”对话框。

输入大小，幅值选择“RAMP”，单击“确定”。

以下命令即代表了对话框中的设置。

```
** LOADS
**
**施加 Pres 载荷，类型为压力
**
** Name: Pres     Type: Pressure
**
**选择载荷幅值为 RAMP
**
*Dsload, amplitude=RAMP
_PickedSurf24, P, 1.7e+06
**
```



图 15-86 “编辑载荷”对话框

单击按钮创建三个边位移/转角类型的边界条件，均选择“Apply-Pressure”分析步。以下为三个边界条件在各分析步的设置状态。

■ BC-Diskback

如图 15-87 所示，BC-Diskback 在“Apply-Pressure”分析步中约束图 15-88 所示的区域的 U3 方向平移自由度。



图 15-87 “编辑边界条件”对话框

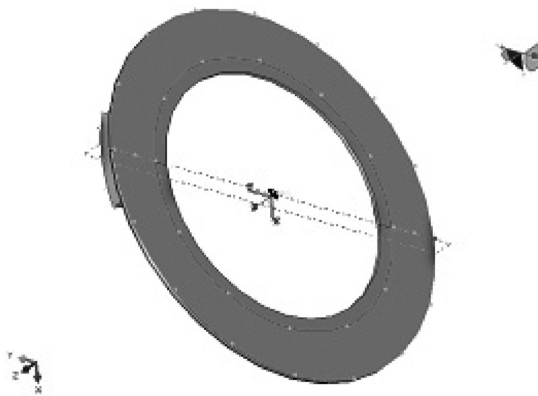


图 15-88 约束部分

使用命令通常更为简洁明了。

```
** Name: BC-Diskback Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet25, 3, 3
**
```

■ BC-PadUp

如图 15-89 所示，BC-PadUp 在“Apply-Pressure”分析步中约束图 15-90 所示的区域的 U1、U2 方向平移自由度。



图 15-89 “编辑边界条件”对话框

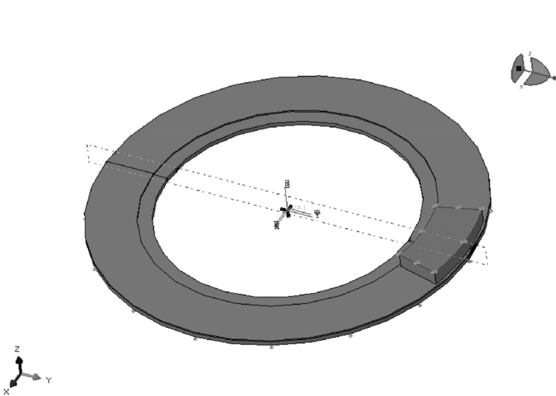


图 15-90 约束部分

使用命令通常更为简洁明了。

```
** Name: BC-PadUp Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet26, 1, 1
_PickedSet26, 2, 2
**
```

■ BC-RP-1

如图 15-91 所示，BC-RP-1 在“Apply-Pressure”分析步中约束图 15-92 所示的参考点的所有方向自由度。



图 15-91 “编辑边界条件”对话框

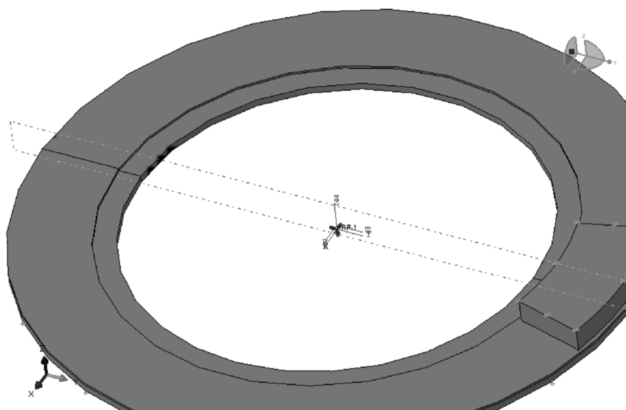


图 15-92 约束部分

使用命令通常更为简洁明了。

```
**创建 BC-RP-1 边界条件，类型为“位移/转角”
**
** Name: BC-RP-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet27, 1, 1
_PickedSet27, 2, 2
_PickedSet27, 3, 3
_PickedSet27, 4, 4
_PickedSet27, 5, 5
_PickedSet27, 6, 6
**
```

单击右侧的按钮，弹出图 15-93 所示的“边界条件管理器”对话框，选择“Rotation”分析步下的“BC-RP-1”边界，单击“编辑”，弹出图 15-94 所示的“编辑边界条件”对话框，设置如图 15-94 所示。



图 15-93 “边界条件管理器”对话框

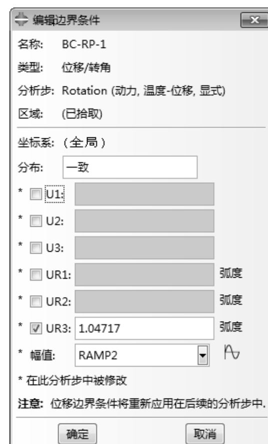


图 15-94 “编辑边界条件”对话框

单击图 15-94 所示的“编辑边界条件”对话框中“幅值”右侧的，在图 15-95 所示的“编辑幅值”对话框中编辑幅值。



图 15-95 “编辑幅值”对话框

Rotation 分析步的边界条件设置命令如下。

```
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**
**创建 BC-Diskback 边界条件，类型为“位移/转角”
**
** Name: BC-Diskback Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
_PickedSet25, 3, 3
**
**创建 BC-PadUp 边界条件，类型为“位移/转角”
**
** Name: BC-PadUp Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW
_PickedSet26, 1, 1
_PickedSet26, 2, 2
**
**创建 BC-RP-1 边界条件，类型为“位移/转角”
**
** Name: BC-RP-1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary, op=NEW, amplitude=RAMP2
_PickedSet27, 6, 6, 1.04717
**
**
```

（8）完成加载后，进入“网格划分”模块。

单击按钮，拾取 Disk 部件的所有圆弧，单击中键弹出图 15-96 所示的“局部种子”对话框。设置“单元数”为“20”，单击“确定”。还是采用上述操作，将 Pad 部件的所有圆弧定义为 4 个单元、径向直线 4 个单元、轴向 3 个单元。完成布种应如图 15-97 所示。



图 15-96 “局部种子”对话框

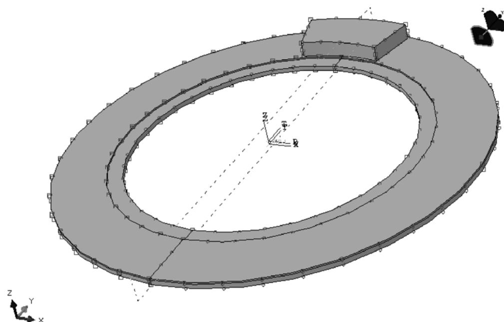


图 15-97 种子

单击按钮，在图 15-98 所示的“单元类型”对话框中选择 C3D8RT（八结点热耦合六面体单元，三向线性位移，三向线性温度，减缩积分，沙漏控制）单元。单击按钮，完成

划分的网格如图 15-99 所示。



图 15-98 “单元类型”对话框

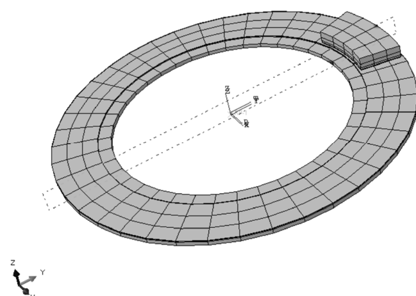


图 15-99 网格划分

（9）进入“作业”模块，创建一个作业，定义好并行计算设置即可以开始计算。

本例为读者提供完整 INP 代码，以供读者参考，详见光盘。

（10）完成计算后即可进行后处理。进入“可视化”模块。在 工具中选择“主应力符号”，显示第一个分析步的加载过程，如图 15-100 所示，图 15-101 所示为 INC=4 时的应力符号。

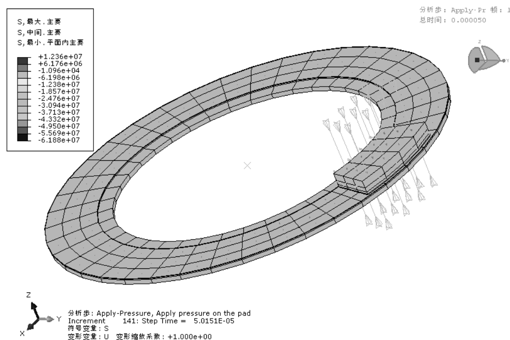


图 15-100 STEP1，INC=1 时的应力符号

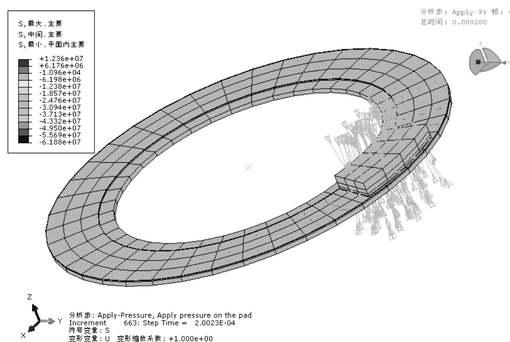


图 15-101 STEP1，INC=4 时的应力符号

图 15-102 所示为 INC=18 时的应力符号，图 15-103 为 INC=20 时的应力符号。

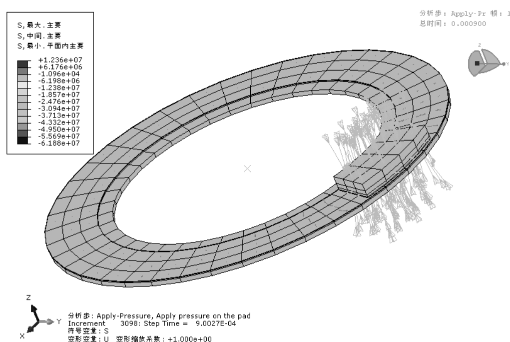


图 15-102 STEP1，INC=18 时的应力符号

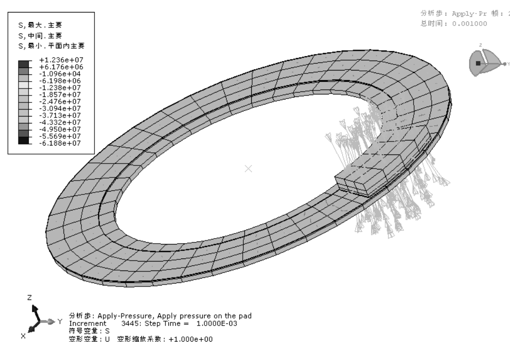


图 15-103 STEP1，INC=20 时的应力符号

开始施加旋转，进入“Rotation”分析步，图 15-104 所示为开始旋转，STEP=2、INC=1 时应力符号，图 15-105 为 INC=8 时的应力符号。

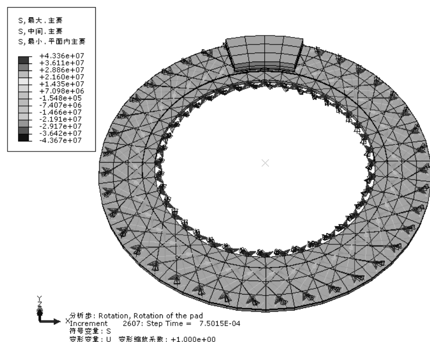


图 15-104　STEP2，INC=1 时的应力符号

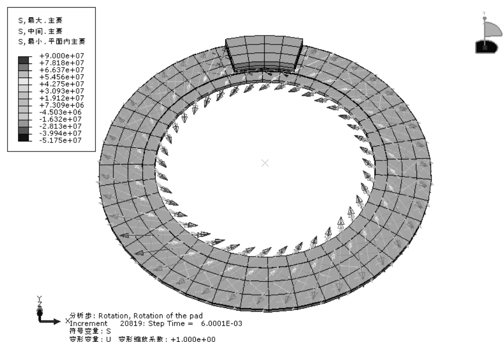


图 15-105　STEP2，INC=8 时的应力符号

图 15-106 所示为 INC=18 时的应力符号，图 15-107 为 INC=20 时的应力符号。

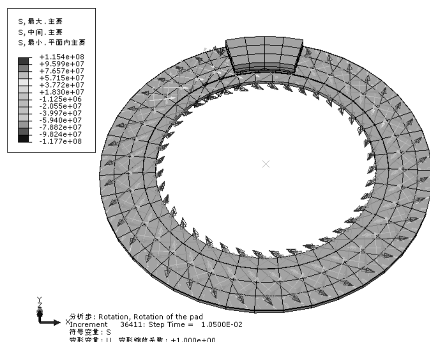


图 15-106　STEP2，INC=18 时的应力符号

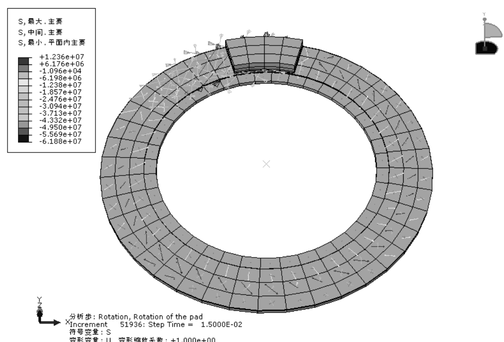


图 15-107　STEP2，INC=20 时的应力符号

在工具栏中的 主 S Mises 选择“主变量→应力分量→Mises 应力”，在视图区中显示给 Pad 部件施加压力时的云图如图 15-108 所示，图 15-109 所示为 INC=4 时的应力云图。

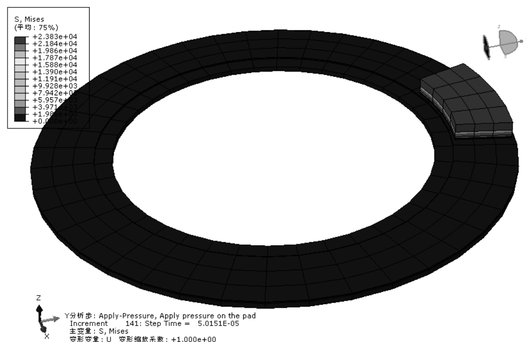


图 15-108　STEP1，INC=1 时的应力云图

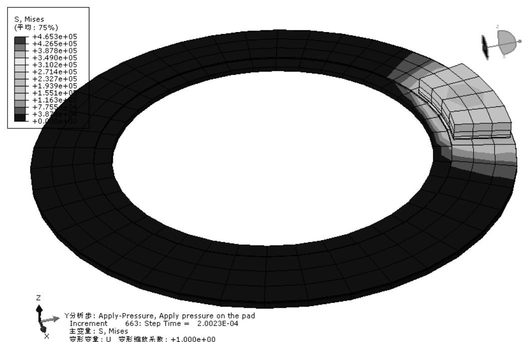


图 15-109　STEP1，INC=4 时的应力云图

图 15-110 所示为 INC=10 时的应力云图，图 15-111 所示为 INC=17 时的应力云图。

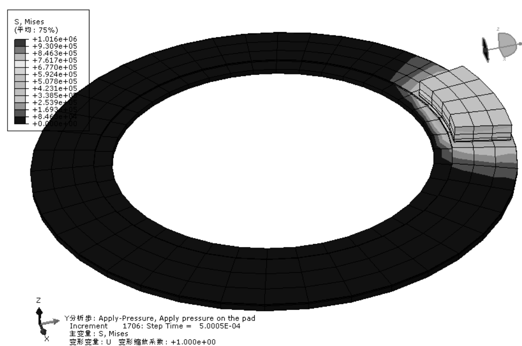


图 15-110 STEP1，INC=10 时的应力云图

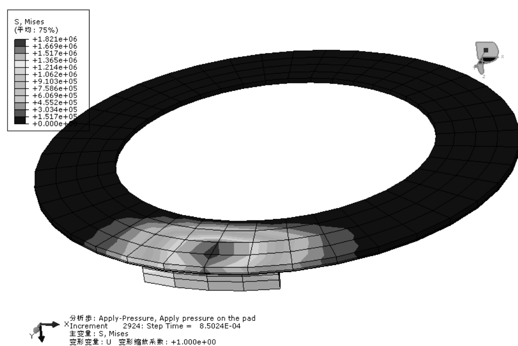


图 15-111 STEP1，INC=17 时的应力云图

进入“Rotation”分析步，图 15-112 所示为 STEP2、INC=1 时的应力云图，图 15-113 所示为 INC=9 时的应力云图。

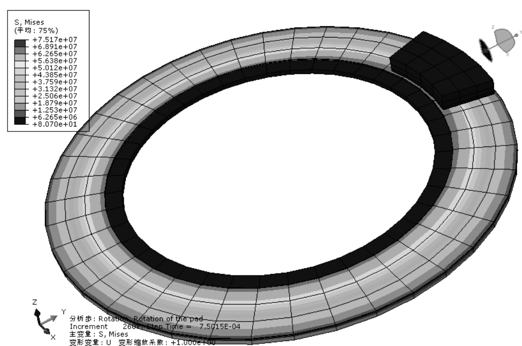


图 15-112 STEP2，INC=1 时的应力云图

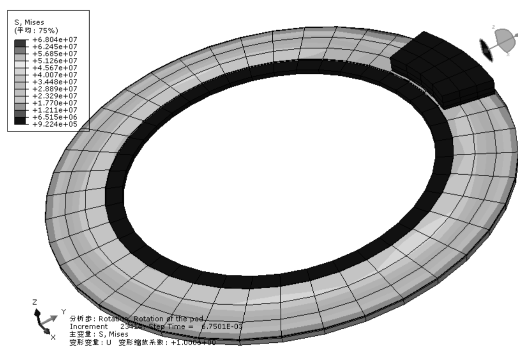


图 15-113 STEP2，INC=9 时的应力云图

图 15-114 所示为 INC=19 时的应力云图。图 15-115 所示为 INC=20 时的应力云图。

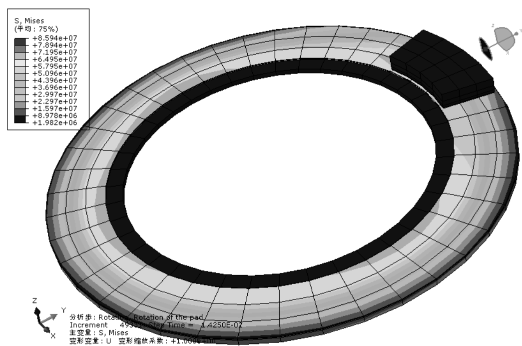


图 15-114 STEP2，INC=19 时的应力云图

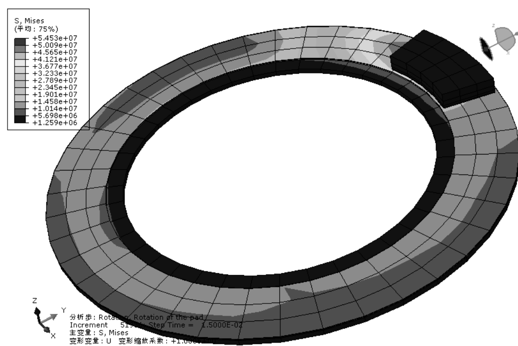


图 15-115 STEP2，INC=20 时的应力云图

在 主 NT11 中选择主变量为 NT11，即结点温度，显示在“Applly-pressure”分析步中的温度云图如图 15-116 所示。整个“Applly-pressure”分析步温度分布

都如图 15-116 所示。

进入“Rotation”分析步，INC=5 时温度分布如图 15-117 所示。

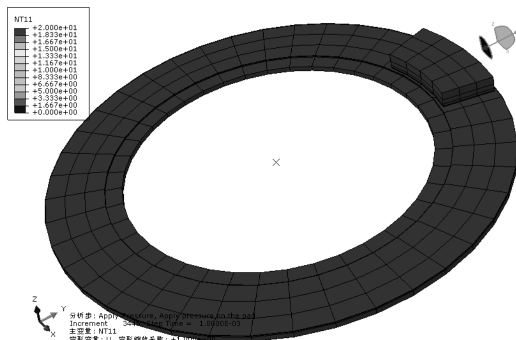


图 15-116　STEP1，INC=20 时的温度云图

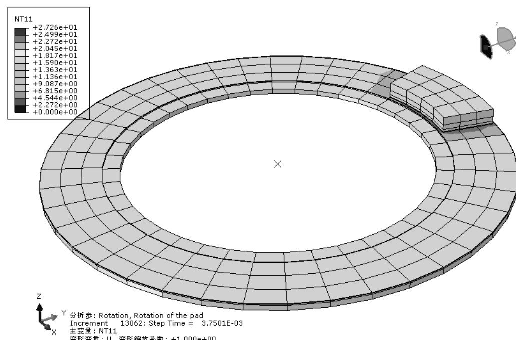


图 15-117　STEP2，INC=5 时的温度云图

INC=15 时温度分布如图 15-118 所示。INC=20 时的温度分布如图 15-119 所示。

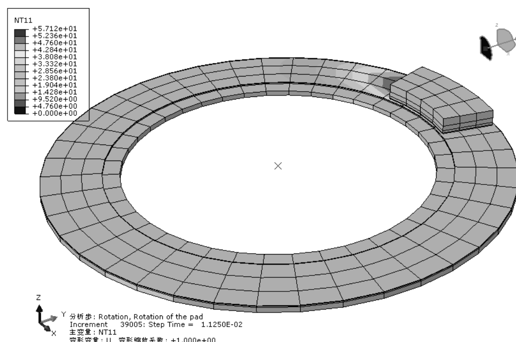


图 15-118　STEP2，INC=15 时的温度云图

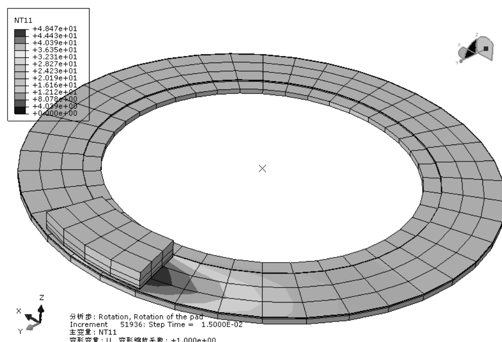


图 15-119　STEP2，INC=20 时的温度云图

15.3　本章小结

本章为读者介绍了使用 ABAQUS 进行热力学分析的方法。热力学分析与单一的结构分析一样，都可以进行瞬态的或者稳态的分析。考虑到主要是温度变化引起热应力，热力学分析的主要应用场合大多包含时间历程上的变化。进行热力学分析的最终目的，仍是为了得到应力结果，因此，热分析更为重要的应用是与结构分析耦合。

耦合分析，就是将热分析与其他类型的分析结合起来进行分析。ABAQUS 可进行的热耦合分析包括：热-结构耦合分析、热-流体耦合分析、热-电耦合分析、热-磁耦合分析以及热-电-磁-结构耦合分析。



第 16 章　加工仿真应用

机械加工是指通过各种机械对工件的外形尺寸或性能进行改变的过程。广义是指能用机械手段制造产品的过程；狭义是指用车床（Lathe Machine）、铣床（Milling Machine）、钻床（Driling Machine）、磨床（Grinding Machine）、冲压机及压铸机等专用机械设备制作零件的过程。

机械产品的加工工艺种类繁多，成型工艺、焊接工艺、热处理、锻造及切削等是十分常见的工艺过程。借助于有限元的工艺仿真，通过对加工过程的数据模拟，能够深入全面地了解加工过程，优化设计加工工艺参数。使用有限元方法进行机械加工工艺过程仿真有助于减少模具的制作费用和试探性的原型试验费用，优化的坯料几何可以降低材料消耗，减少产品开发成本。加工工艺仿真能够帮助用户了解加工过程中的材料流动、热效应、残余应力、应变和模具损伤，增强工艺过程和加工产品的可靠性，通过改进工艺，达到提高产品质量、降低成本费用的目的。

本章学习目标

- 了解机械加工仿真的特点
- 掌握计算成本优化的方法
- 掌握进行复杂问题求解的方法
- 掌握进行复杂模型简化的方法

16.1　机械加工仿真概述

锻造、挤压、拉伸、轧制、冲压成型以及超塑、蠕变等成型工艺都是通过模具的主动运动，强制工件产生很大的塑性流动，获得所需形状和尺寸成型产品的方法。在成型过程中，接触/摩擦以及摩擦生热、有限塑性变形等非线性问题无法回避。ABAQUS 软件能较好地对机械加工过程进行仿真计算。

16.1.1　机械加工问题的特征

机械加工工艺问题从有限元分析的角度来看，属于几何、材料和边界条件都呈现高度非线性的结构分析问题，有时还要涉及多物理场耦合。总之，使用有限元方法对机械加工过程进行模拟分析，就目前的状况来看主要有以下几个特点。

- 加工过程类型多样，涉及不同的分析方法。如锻造、挤压、轧制、冲压、超塑、蠕变和切削等，针对不同的问题，需要使用不同的方法。比如在切削过程模拟中，需要考虑材料的失效准则以及切屑的分离方法；又如在进行冲压过程的模拟时，使用显式算法比较合理，而考虑冲压后金属的回弹时，使用隐式算法结果更为精确。
- 涉及复杂的非线性问题。各种常见的非线性问题：如几何、材料和边界条件非线

性，在机械加工过程中都普遍存在。比如在冲压过程中模具和坯料之间存在着复杂的接触关系，在锻造过程中存在着材料的高度非线性问题等。

■ 计算消耗较大。对于机械加工过程的模拟。由于存在着各种非线性问题，需要考虑多种因素的影响，有时虽然几何模型和有限元模型表面上并不是很复杂，但是由于其他因素，会使得计算量非常大。如旋压过程，由于加工时间很长（十几分钟以上）使得计算时间也相当长。

ABAQUS 软件经过长期不懈的积累和高品质的开发；形成了自如地处理高度组合非线性问题和接触问题的巨大优势。加之 ABAQUS 软件模拟各种材料行为的突出能力及极大的灵活性，能够非常容易地完成常规合金、非常规金属以及非金属材料的工艺过程仿真。

16.1.2 计算成本优化

■ ABAQUS/Explicit 准静态分析

显式求解方法是一种真正的动态求解过程，它的最初发展是为了模拟高速冲击问题，在这类问题的求解中惯性发挥了主导性作用。当求解动力平衡的状态时，非平衡力以应力波的形式在相邻的单元之间传播。由于最小稳定时间增量一般是非常小的值，所以大多数问题需要大量的时间增量步。

在求解准静态问题上，显式求解方法被证明是极适用的，另外 ABAQUS/Explicit 在求解某些类型的静态问题方面比 ABAQUS/Standard 更容易。在求解复杂的接触问题时，显式过程相对于隐式过程的一个优势是更加容易。此外，当模型很大时，显式过程比隐式过程需要较少的系统资源。关于隐式与显式过程的详细比较在前文已有叙述，本处不再赘述。

将显式动态过程应用于准静态问题需要一些特殊的考虑。根据定义，由于静态求解是一个长时间的求解过程，所以在其固有的时间尺度上分析模拟常常在计算上是不切合实际的，它将需要大量的小的时间增量。因此，为了获得较经济的解答，必须采取一些方式来加速问题的模拟。但是带来的问题是随着过程的加速，静态平衡的状态卷入了动态平衡的状态，在这里惯性力成为更加起主导作用的力。因此，加速的目标是在保持惯性力的影响不显著的前提下用最短的时间进行模拟。

准静态分析也可以在 ABAQUS/Standard 中进行。当惯性力可以忽略时，在 ABAQUS/Standard 中的准静态应力分析用来模拟含时间相关材料响应（蠕变、膨胀、粘弹性和双层粘塑性）的线性或非线性问题。关于在 ABAQUS/Standard 中准静态分析的更多信息，请参阅 ABAQUS 分析用户手册的相关章节。

■ 显式动态问题类比

为了使用户能够更直观地理解在缓慢、准静态加载情况和快速加载情况之间的区别，我们用图 16-1 来类比说明。

图中显示了两个载满乘客的电梯。在缓慢的情况下，门打开后用户步入电梯。为了腾出空间，邻近门口的人慢慢地推他们身边的人，这些被推的人再去推他们身边的人，如此继续下去。这种扰动在电梯中传播，直到靠近墙边的人表示他们无法移动为止。一系列的波在电梯中传播，直到每个人都到达了一个新的平衡位置。如果用户稍稍加快速度，用户会比前面更用力地推动其身边的人，但是最终每个人都会停留在与缓慢的情况下相同的位置。

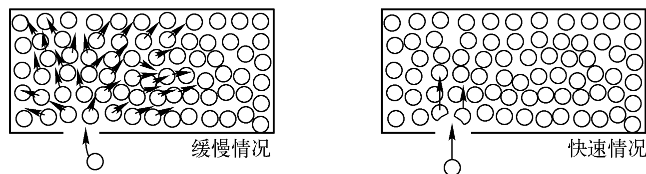


图 16-1　缓慢和快速加载情况的类比

在快速情况下，门打开后用户以很高的速度冲入电梯，电梯里的人没有时间挪动位置来重新安排他们自己以便容纳用户。用户将会直接撞上门口的两个人，而其他人则没有受到影响。

对于准静态分析，实际的道理是同样的。分析的速度经常可以提高许多而不会严重地降低准静态求解的质量；缓慢情况下和有一些加速情况下的最终结果几乎是一致的。但是，如果分析的速度增加到一个点，使得惯性影响占主导地位时，解答就会趋向于局部化，而且结果与准静态的结果是有一定区别的。

■ 加载速率

一个物理过程所占用的实际时间称为它的固有时间（nature time）。对于一个准静态过程在固有时间中进行分析，我们一般有把握假设将得到准确的静态结果。这是因为，如果实际事件真实地发生在其固有时间尺度内，并在结束时其速度为零，那么动态分析应该能够得到这样的事实，即分析实际上已经达到了稳态。用户可以提高加载速率使相同的物理事件在较短的时间内发生，只要解答保持与真实的静态解答几乎相同，而且动态效果保持是不明显的。

■ 光滑幅值曲线

对于准确和高效的准静态分析，要求施加的载荷要尽可能的光滑。突然、急促的运动会产生应力波，它将导致振荡或不准确的结果。以最光滑的方式施加载荷，要求加速度从一个增量步到下一个增量步只能改变一个小量。如果加速度是光滑的，随其变化的速度和位移也是光滑的。

ABAQUS 有一条简单、固定的光滑步骤（smooth step）幅值曲线，它自动地创建一条光滑的载荷幅值。当用户定义一个光滑步骤幅值曲线时，ABAQUS 自动地用曲线连接每一组数据对，该曲线的一阶和二阶导数是光滑的，在每一组数据点上，它的斜率都为零。由于这些一阶和二阶导数都是光滑的，用户可以采用位移加载，应用一条光滑步骤幅值曲线，只需要初始的和最终的数据点，而中间的运动将是光滑的。使用这种载荷幅值允许用户进行准静态分析而不会产生由于加载速率不连续引起的波动。一条光滑步骤幅值曲线的例子如图 16-2 所示。

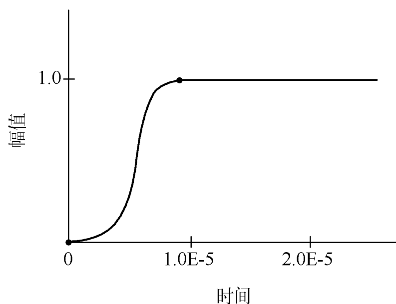


图 16-2　采用光滑步骤幅值曲线的幅值定义

■ 结构问题

在静态分析中，结构的最低模态通常控制着结构的响应。如果已知最低模态的频率和相应的周期，用户可以估计出得到适当的静态响应所需要的时间。接着举例说明如何确定适当的加载速率，例如在汽车门上的一根梁被一个刚性圆环从侧面侵入的变形，如图 16-3 所示。实际的实验是准静态的。

采用不同的加载速率，梁的响应变化很大。以一个极高的碰撞速度为 400m/s，在梁中的变形是高度局部化的，如图 16-4 所示。为了得到一个更好的准静态解答，考虑最低阶的模态。

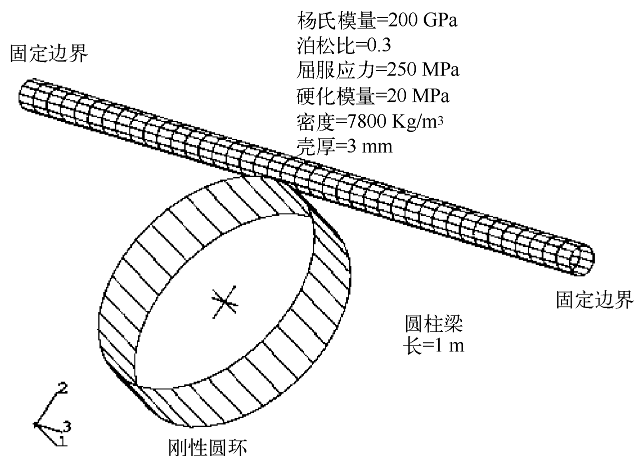


图 16-3　刚性圆环与梁的碰撞

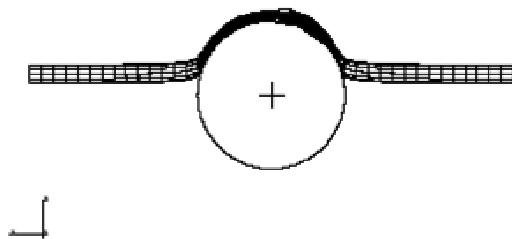


图 16-4　碰撞速度为 400m/s

最低阶模态的频率大约为 250Hz，它对应于 4ms 的周期。应用在 ABAQUS/Standard 中的特征频率提取过程可以容易地计算自然频率。为了使梁在 4ms 内发生所希望的 0.2m 的变形，圆环的速度为 50m/s。虽然 50m/s 似乎仍然像是一个高速碰撞速度，而惯性力相对于整个结构的刚度已经成为次要的了，如图 16-5 所示，变形形状显示了很好的准静态响应。

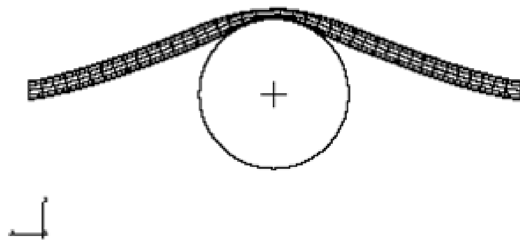


图 16-5　碰撞速度为 50m/s

虽然整个结构的响应显示了我们所希望的准静态结果，但通常理想的是将加载时间增加到最低阶模态的周期的 10 倍以确保解答是真正的准静态。为了更进一步地改进结果，刚性圆环的速度可能会逐渐增大，例如应用一条光滑步骤幅值曲线，从而减缓初始的冲击。

■ 金属成型问题

为了获得低成本的求解过程，人为地提高成型问题的速度是必要的，但是，我们能够把速度提高多少仍可以获得可接受的静态解答呢？例如薄金属板毛坯的变形对应于其最低阶模态的变形形状，可以应用最低阶结构模态的时间周期来指导成型的速度。然而在成型过程

中，刚性的冲模和冲头能够以如此的方式约束冲压，使坯件的变形可能与结构的模态无关。在这种情况下，一般性的建议是限制冲头的速度小于1%的薄金属板的波速。对于典型的成型过程，冲头速度是在1m/s的量级上，而钢的波速大约为5000m/s。因此根据这个建议，选一个50的因数作为冲头提高速度的上限。

为了确定一个可接受的冲压速度，可以以各种变化的冲压速度运行一系列的分析，这些速度在3～50m/s的范围内。由于求解的时间与冲压的速度成反比，运行分析是以冲压速度从最快到最慢的顺序进行。检查分析的结果，感受变形形状、应力和应变是如何随冲压速度而改变的。冲压速度过高的一些表现是与实际不符的、局部化的拉伸与变薄，以及对起皱的抑止。如果用户从一个冲压速度开始，例如50m/s，并从某处减速，如果在某点上从一个冲压速度到下一个冲压速度的解答是相似的，这说明解答开始收敛于一个准静态的解答。当惯性的影响不明显时，在模拟结果之间的区别也是不明显的。

随着人为地增加加载速率，以逐渐和平滑的方式施加载荷成为越来越重要的方式。例如，最简单的冲压加载方式是在整个成型过程中施加一个定常的速度。在分析开始时，如此加载会对薄金属板坯件引起突然的冲击载荷，在坯件中传播应力波并可能产生不希望的结果。当加载速率增加时，任何冲击载荷对结果的影响都更加明显。应用光滑步骤幅值曲线，使冲压速度从零逐渐增加可以使这些不利的影响最小化。

■ 回弹

回弹是成型分析的一个重要部分，因为回弹分析决定了卸载后部件的最终形状。尽管ABAQUS/Explicit十分适合于成型模拟，对回弹分析却存在一些困难。在ABAQUS/Explicit中进行回弹模拟最主要的问题是需要大量的时间来获得稳态的结果。特别是必须非常小心地卸载，并且必须引入阻尼以使得求解的时间比较合理。

由于回弹过程不涉及接触，而且一般只包括中度的非线性，所以可以使用ABAQUS/Standard求解回弹问题，并且比ABAQUS/Explicit求解得更快。因此，对于回弹分析更好的方法是将完整的成型模型从ABAQUS/Explicit输入（import）到ABAQUS/Standard中进行。

■ 质量放大

质量放大（mass scaling）可以在不需要人为提高加载速率的情况下降低运算的成本。对于含有率相关材料或率相关阻尼（如减震器）的问题，质量放大是唯一能够节省求解时间的选择。在这种模拟中，因为材料的应变率会与加载速率同比例增加，所以不要选择提高加载速率。当模型的参数随应变率变化时，人为地提高加载速率反而会人为地改变分析的过程。

稳定时间增量与材料密度之间的关系如方程（16-1）所示。模型的稳定极限是所有单元的最小稳定时间增量。它可以表示成为：

$$\Delta t=\frac{L^{\varepsilon}}{c_d} \tag{16-1}$$

式中 L^{ε}——特征单元长度；

c_d——材料的膨胀波速。

线弹性材料在泊松比为零时的膨胀波速为：

$$c_d=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{16-2}$$

式中　ρ——材料密度。

根据式（16-1）与式（16-2），人为地将材料密度ρ增加因数 f^2 倍，则波速就会降低至原来的 1/f，从而稳定时间增量将提高因数 f 倍。到当全局的稳定极限增加时，进行同样的分析所需要的增量步就会减少，这正是质量放大的目的。但是，放大质量对惯性效果与人为地提高加载速率恰好具有相同的影响。因此，过度地质量放大，正如过快地加载速率，可能会导致错误的结果。为了确定一个可接受的质量放大因数，建议采取类似于确定一个可接受的加载速率放大因数的方法。两种方法的唯一区别是与质量放大相关的加速因子是质量放大因数的平方根，而与加载速率放大相关的加速因子是与加载速率放大因数成正比。例如，一个为 100 倍的质量放大因数恰好对应于 10 倍的加载速率因数。

通过使用固定的或可变的质量放大，可以有多种方法来实现质量放大编程。质量放大的定义也可以随着分析步而改变，允许有很大的灵活性。详细的内容请参阅 ABAQUAS 用户手册相关章节。

■ 能量平衡

评估模拟是否产生了正确的准静态响应，最具有普遍意义的方式是研究模型中的各种能量。下面是在 ABAQUS/Explicit 中的能量平衡方程：

$$E_I + E_V + E_{KE} + E_{FD} - E_W = E_{total} = \text{constant} \quad (16\text{-}3)$$

式中　E_I——内能（包括弹性和塑性应变能）；

E_V——粘性耗散吸收的能量；

E_{KE}——动能；

E_{FD}——摩擦耗散吸收的能量；

E_W——外力所做的功；

E_{total}——在系统中的总能量。

下面举一个简单的例子来说明能量平衡，如图 16-6a 所示的一个单轴拉伸实验。

准静态实验的能量历史显示在图 16-6b 中。如果模拟是准静态的，那么外力所做的功是几乎等于系统内部的能量。除非有粘弹性材料、离散的减震器或者使用了材料阻尼，否则粘性耗散能量一般是很小的。由于在模型中材料的速度很小，所以在准静态过程中，我们已经确定惯性力可以忽略不计。由这两个条件可以推论，动能也是很小的。作为一般性的规律，在大多数过程中，变形材料的动能将不会超过它的内能的一个小的比例（典型的为 5%～10%）。

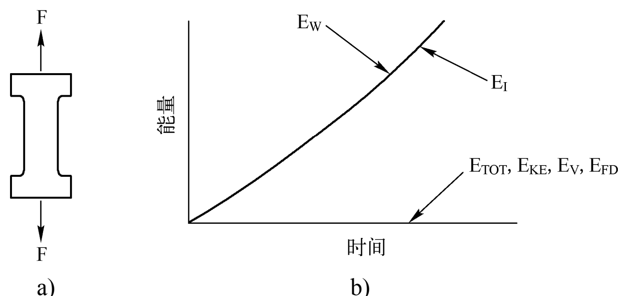


图 16-6　单轴拉伸实验与准静态拉伸实验的能量历史

当比较能量时，请注意 ABAQUS/Explicit 报告的是整体的能量平衡，它包括了任何含有质量的刚体的动能。当评价结果时我们只对变形体感兴趣，因此在评价能量平衡时我们应在

E_{total} 中扣除刚体的动能。

例如，用户正在模拟一个采用滚动刚体模具的传输问题，刚体的动能可能占据模型整个动能的很大一部分。在这种情况下，用户必须扣除与刚体运动有关的动能，才可能作出与内能有意义的比较。



■ 加速分析的方法

因为采用显式动态标准的成型问题的实际时间是过长的，所以大部分成型分析都需要过多的计算机时间以至于无法按照它们自己的物理时间尺度进行运算；若使分析在一个可接受的计算机时间范围内运行，常常需要对分析作出改变以减少计算成本。有两种节省分析成本的方法：

- 人为地增加加载的速度，从而在一个更短的分析步时间内发生同样的成型过程。这种方法称为加载速率放大（load rate scaling）。
- 人为地增加单元的质量密度，从而增大稳定时间极限，允许分析采用较少的增量步。这种方法称为质量放大（mass scaling）。

这两种方法是等效的，除非模型具有率相关材料或者阻尼。

■ 确定可接受的质量放大

“加载速率”和“金属成型问题”讨论了如何确定可接受的加载速率或质量的放大因子以减小准静态分析的时间消耗。其目标是在保持惯性力不显著的前提下以最短的时间模拟过程。而且还要能够得到一个有意义的准静态解答，然而求解的时间加快多少是有界的。

如在“加载速率”中讨论的那样，我们可以应用同样的方法确定一个合适的质量放大因子。这两种方法加载速率放大因子 f 与质量放大因子 f^2 的效果相同。首先，我们假设分析步的时间为坯件的基频周期的阶数时，会产生适当的准静态结果。通过研究模型的能量和其他的结果，我们相信这些结果是可以接受的。这项技术产生了大约 4.3m/s 的加载速度。我们现在将接受采用质量放大的求解时间，并将结果与我们没有质量放大求解的结果进行比较，以确定由质量放大得到的结果是否可以接受。我们假设这种放大仅可能降低结果的质量，而不会使其得到改进。目的是应用质量放大以减少计算时间，并仍能产生可接受的结果。

■ 加速方法的讨论

随着质量放大的增加，求解的时间减少。由于动态效果越来越显著，结果的质量也在随之下降。但是理论上存在着某一放大因子，它既改进了求解的时间，又不牺牲结果的质量。例如，一个加速因子为 5 时过大以至于无法产生关于分析的准静态结果。一个更小的加速因子 $\sqrt{5}$ 则不会明显地影响结果。当应用放大因子为 10 时，结果的质量开始退化，而一般的量和结果的趋势仍然保持未受到影响，相应地动能与内能的比明显地增加了。此结果适用于大部分的情况，但是不适用于精确的回弹分析。

■ 小结

- 如果一个准静态分析以它的固有时间尺度进行，其解答将几乎与一个真正的静态解答相同。
- 采用加载速率放大或质量放大的方法来获得准静态的解答，可以以较少的 CPU 时间获得求解。
- 只要解答不发生局部化，加载速率常常可以增加一些。如果加载速率提高过大，惯性力则会给解答带来不利的影响。

- 质量放大是提高加载速率的另一种方法。当使用率相关材料时，最好采用质量放大的方法，因为提高加载速率将人为地改变材料的参数。
- 在静态分析中，结构的最低阶模态控制着响应。如果知道了最低阶的自然频率，以及对应的最低阶模态的周期，用户可以估计获得正确的静态响应所需要的时间。
- 以各种加载速率运行一系列的分析以确定一个可接受的加载速率常常是必要的。
- 在大部分的模拟过程中，变形材料的动能决不能超过其内能的一个很小的百分比（典型地为 5%～10%）。
- 在准静态分析中，为了描述位移，最有效的方式是使用一条光滑步骤幅值曲线。

16.2　机械加工仿真实例

机械加工过程涉及复杂的工程知识，是比较典型的高度非线性的问题，最适于使用 ABAQUS 进行求解。本节为讲解机械加工仿真的方法，结合实例学习，读者应初步掌握分析实际问题的方法。

16.2.1　ABAQUS 仿真实例——旋压加工

旋压是将平板或空心坯料固定在旋压机的模具上，在坯料随机床主轴转动的同时，用旋轮或赶棒加压于坯料，使之产生局部的塑性变形。在旋轮的进给运动和坯料的旋转运动共同作用下，使局部的塑性变形逐步地扩展到坯料的全部表面，并紧贴于模具，完成零件的旋压加工。

旋压是一种特殊的成型方法，可以完成各种形状旋转体的拉深、翻边、缩口、胀形和卷边等工艺。旋压设备可分类如下。

■ 按变形原理

普通旋压机。

强力旋压机。

■ 按主轴位置

卧式旋压机：主轴为水平方向的叫做卧式旋压机。

立式旋压机：主轴为垂直方向的叫做立式旋压机。

■ 按旋轮个数

单旋轮旋压机：只有一个旋轮的旋压机称为单轮旋压机。

双旋轮旋压机：有两个旋轮的旋压机称为双轮旋压机。

三旋轮旋压机：有三个旋轮的称为三轮旋压机。

多旋轮：有三个以上旋轮的称为多轮旋压机。

■ 芯模相对位置

外旋压机：旋轮从外部对工件进行旋压的旋压机。

内旋压机：旋轮从内部对工件进行旋压的旋压机。

■ 按金属流动方向

正旋旋压机：金属流动方向与旋轮运动方向相同的旋压机。

反旋旋压机：金属流动方向与旋轮运动方向相反的旋压机。

正反旋旋压机：金属在旋压过程中向两个方向流动的旋压机。

■ 按旋压温度

热旋压机：能够对工件进行加热旋压的旋压机。

冷旋压机：在常温下进行旋压的旋压机。

旋压过程中板坯与芯模共同旋转，由辊轮进给并施加压力，使板坯紧贴芯模逐点局部变形冲压成型。旋压可制造各种轴对称旋转体零件，如扬声器、弹体、高压容器封头、铜锣；也可用于气瓶收口、筒坯成型等。

旋压的特点是：用很小的变形力可成型很大的工件；使用设备比较简单，中小尺寸的薄板件可用普通车床旋压；模具简单，只需要一块芯模，材质要求低。

旋压加工的优点是设备和模具都比较简单（没有专用的旋压机时可用车床代替），除可成形如圆筒形、锥形、抛物面或其他各种曲线构成的旋转体外，还可加工相当复杂形状的旋转体零件。缺点是生产率较低，劳动强度较大，比较适用于试制和小批量生产。

本例将对图 16-7 所示的旋压加工模型进行仿真，旋轮与工件的尺寸参数见表 16-1，旋压过程采用反旋，即毛坯左部施加固定约束，旋轮从右向左移动，材料流动方向与旋轮方向相反。

毛坯材料参数见表 16-2。

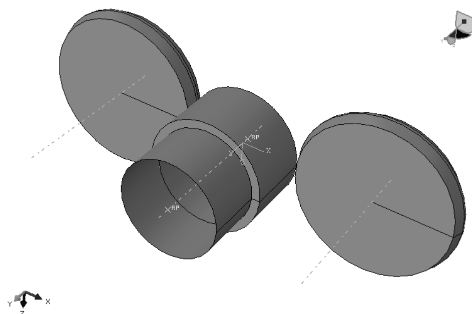


图 16-7 加工仿真模型

表 16-1 工件与旋轮尺寸

旋轮	直径	100mm
	圆角半径	5mm
	入旋角	20
	退出角	30
毛坯	长度	80mm
	厚度	10mm
	直径（内）	120mm
芯模	长度	150mm
	直径	120mm
主轴转速		2r/s（120r/min）
减薄率		20%～35%
进给速度		0.2mm/s
密度		7800kg/m^3
弹性模量		2.06E11
泊松比		0.3

表 16-2　毛坯的塑性参数

屈服应力	塑性应变
3.69E+08	0
4.19E+08	0.01
4.72E+08	0.02
5.09E+08	0.03
5.37E+08	0.04
5.62E+08	0.05
5.83E+08	0.06
6.01E+08	0.07
6.18E+08	0.08
6.34E+08	0.09
6.48E+08	0.1

启动 ABAQUS/CAE，开始进入建模分析。

（1）进入“部件”模块。单击按钮，弹出图 16-8 所示的“创建部件”对话框，创建一个“三维”“可变形”的旋转部件，单击“继续”按钮，绘制图 16-9 所示的草图。



图 16-8 “创建部件”对话框

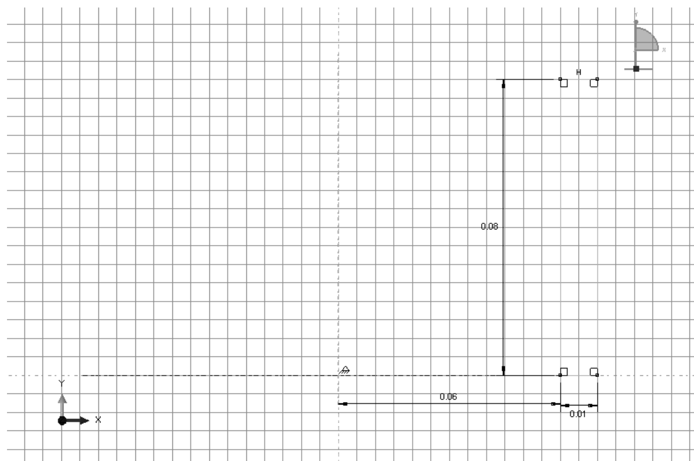


图 16-9　截面草图

完成截面绘制后单击中键，在“编辑旋转”对话框中设置旋转的角度为“360”，生成 roughcast 部件如图 16-10 所示。

单击按钮，弹出图 16-11 所示的“创建部件”对话框，创建一个“三维”“解析刚性”的“旋转壳”部件，单击“继续”按钮，绘制图 16-12 所示的草图。

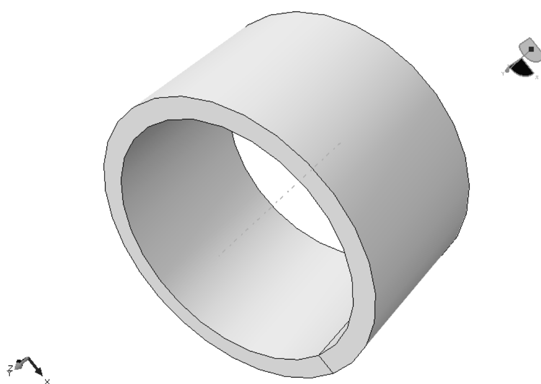


图 16-10　毛坯模型



图 16-11　“创建部件”对话框

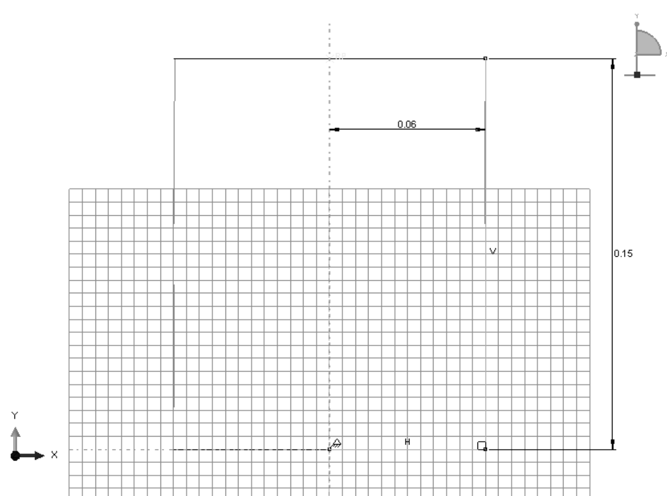


图 16-12　截面草图

完成截面绘制后单击中键，在“编辑旋转”对话框中设置旋转的角度为“360”，生成 mould 部件如图 16-13 所示。

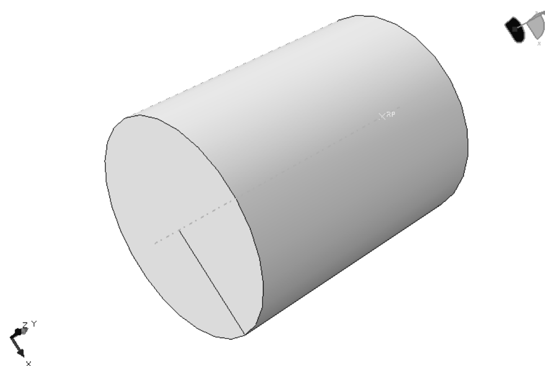


图 16-13　芯轴模型

单击按钮，弹出图 16-14 所示的“创建部件”对话框，创建一个“三维”“解析刚性”的“旋转壳”部件，单击“继续”按钮，绘制图 16-15 所示的草图。



图 16-14 “创建部件”对话框

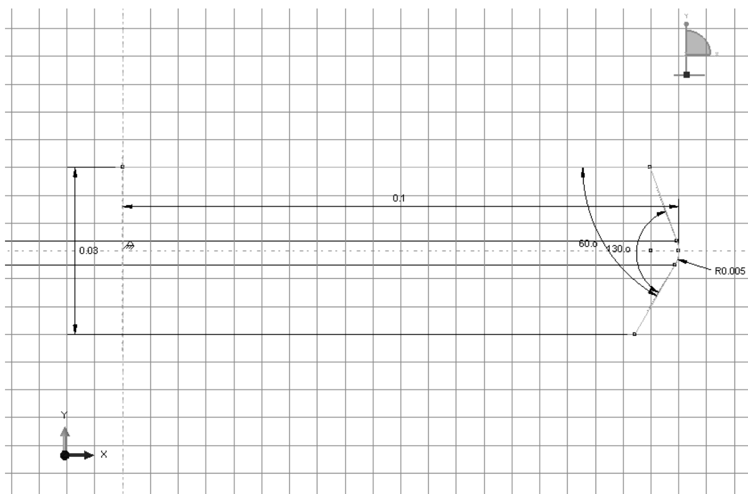


图 16-15 截面草图

完成截面绘制后单击中键，在“编辑旋转”对话框中设置旋转的角度为“360”，生成 roller01 部件如图 16-16 所示。

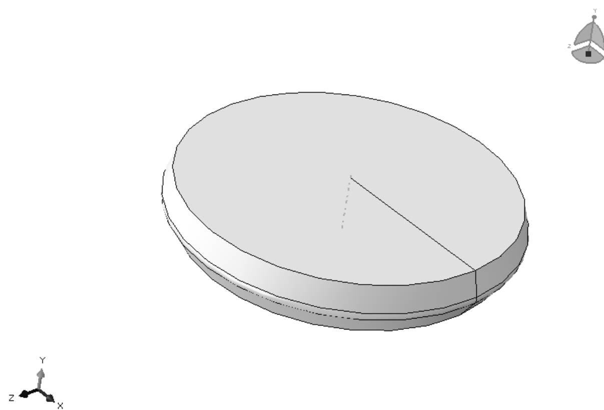


图 16-16 旋轮模型

旋轮的创建过程也可以使用“关键字编辑器”进行，创建思想是一样的，都是先绘制母线然后旋转成为曲面，不同之处在于这些命令即可以出现在部件中，也可以出现在装配块中。

```
*Instance, name=roller02-1, part=roller02
-0.167, -0.01, 0.
*Node
1, 0.166999996, 0., 0.
*Nset, nset=roller02-1-RefPt_, internal
1,
```

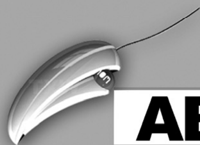
```
*Nset, nset=Set-roller02
 1,
*Surface, type=REVOLUTION, name=roller02-outer
START, 0., 0.0149999999961258
 LINE, 0.094861335348663, 0.0149999999961258
 LINE, 0.0996984631022283, 0.00171010072130253
 CIRCL, 0.1, 0., 0.095, 0.
 CIRCL, 0.0993301270689605, -0.00249999991333109, 0.095, 0.
 LINE, 0.0921132486849028, -0.015
*Rigid Body, ref node=roller02-1-RefPt_, analytical surface=roller02-outer
*Element, type=MASS, elset=Set-roller02_Inertia-ring02_
1, 1
*Mass, elset=Set-roller02_Inertia-ring02_
2.,
*End Instance
**
```

在模型树中，在 roller01 部件上单击鼠标右键，选择菜单中的“复制”命令，将新部件名称定义为 roller02，单击“确定”按钮完成复制。此时模型的四个部件都已创建完成。

本例的特殊之处在于有解析刚性部件，因此注意在“关键字编辑器”中，部件块应为如下状态。

```
** PARTS
**
**开始创建部件，芯轴是解析刚体，所以没有结点
**
*Part, name=mould
*End Part
**
*Part, name=roller01
*End Part
**
*Part, name=roller02
*End Part
**
**开始创建可变形体——毛坯的模型
**
*Part, name=roughcast
**
**毛坯的结点
**
*Node
1, 0.0599999987, 0., 0.
```

这也是 ABAQUS 输入文件命令的特点：INP 文件是不记录几何模型信息的，两个解析刚性体没有结点，因此只有创建了部件的信息，进入可变形部件才开始有结点。



（2）进入“属性”模块。由于本例中将模具部件均定义为刚体，所以只需要为工件定义材料。

单击按钮创建一个名为“steel”的材料，如图 16-17 所示。按图 16-18 进行密度设置。



图 16-17　编辑材料



图 16-18　密度设置

弹性参数中弹性与泊松比按图 16-19 进行设置。在图 16-20 中的塑性参数中输入表 16-2 的参数。

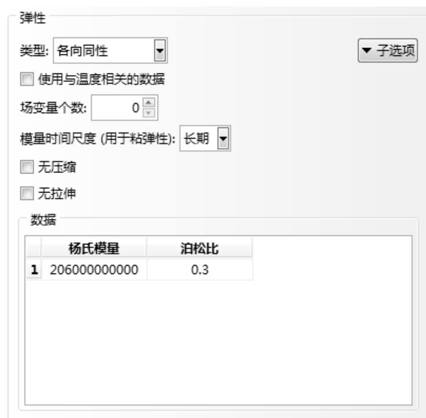


图 16-19　弹性参数设置



图 16-20　塑性参数设置

完成材料创建后，单击按钮，创建一个实体截面，关联 steel 材料，并指派给毛坯。在“关键字编辑器”中，先使用如下命令创建材料。

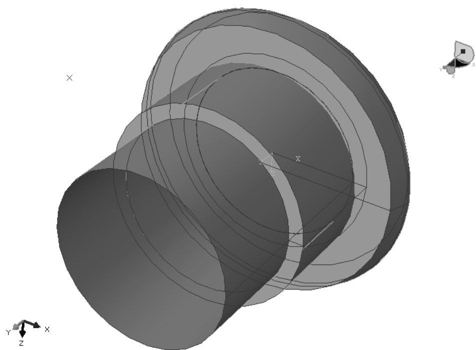
```
** MATERIALS
**steel 材料
*Material, name=steel
*Density
**密度
**
7800.,
```

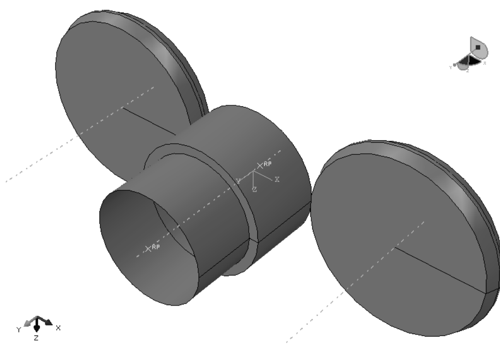
```
*Elastic
**弹性模量与泊松比
**
 2.06e+11, 0.3
*Plastic
**塑性材料参数
**
 3.69e+08,     0.
 4.19e+08, 0.01
 4.72e+08, 0.02
 5.09e+08, 0.03
 5.37e+08, 0.04
 5.62e+08, 0.05
 5.83e+08, 0.06
 6.01e+08, 0.07
 6.18e+08, 0.08
 6.34e+08, 0.09
 6.48e+08,    0.1
**
```

然后进行截面指派。

```
** Section: Sect-rough
*Solid Section, elset=_PickedSet6, material=steel
1.,
```

（3）进入“装配”模块，单击按钮将四个部件实例化，如图 16-21 所示。使用按钮，将各部件调整到图 16-22 所示的位置。

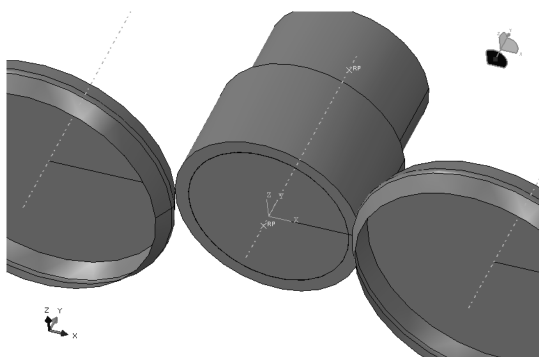

图 16-21　实例初始位置

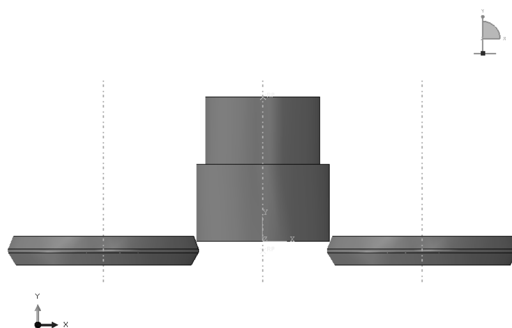

图 16-22　实例装配关系

其中，旋轮与芯轴的轴距为 0.167，芯轴与毛坯端部对齐如图 16-23 所示，旋轮端面与毛坯端面轴向距离为 0.005 如图 16-24 所示。

在本例的关键字编辑过程中，进行装配的同时还行刚性部件的创建。

```
*Instance, name=mould-1, part=mould
**在装配模块中创建芯轴的模型
```


图 16-23　芯轴与毛坯端部对齐


图 16-24　旋轮端面与毛坯端面轴向距离

```
**
*Node
1, 0., 0.150000006, 0.
*Nset, nset=mould-1-RefPt_, internal
1,
*Nset, nset=Set-RP-1
  1,
**由折线旋转为圆柱面
*Surface, type=REVOLUTION, name=mould-outer
START, 0.06, 0.15
  LINE, 0.06, 0.
  LINE, 0., 0.
*Rigid Body, ref node=mould-1-RefPt_, analytical surface=mould-outer
*Element, type=MASS, elset=Set-RP-1_Inertia-mould_
1, 1
*Mass, elset=Set-RP-1_Inertia-mould_
2.,
*End Instance
**创建 1 号旋轮
**
*Instance, name=roller01-1, part=roller01
0.167, -0.01, 0.
*Node
1, -0.166999996, 0., 0.
*Nset, nset=roller01-1-RefPt_, internal
1,
*Nset, nset=Ref-roller01
  1,
*Surface, type=REVOLUTION, name=roller01-outer
START, 0., 0.0149999999961258
  LINE, 0.094861335348663, 0.0149999999961258
  LINE, 0.0996984631022283, 0.00171010072130253
  CIRCL, 0.1, 0., 0.095, 0.
  CIRCL, 0.0993301270689605, -0.00249999991333109, 0.095, 0.
```

```
 LINE, 0.0921132486849028, -0.015
*Rigid Body, ref node=roller01-1-RefPt_, analytical surface=roller01-outer
*Element, type=MASS, elset=Ref-roller01_Inertia-ring01_
1, 1
*Mass, elset=Ref-roller01_Inertia-ring01_
2.,
*End Instance
**
```

（4）完成装配，进入“分析步”模块，创建一个名为“Step-velocity”的显式动力分析步，在“分析步管理器”对话框如图 16–25 所示。单击“创建分析步”对话框中的“继续”按钮，弹出图 16–26 所示的“编辑分析步”对话框，设置“时间长度”为“75”，“几何非线性”默认为“开”。



图 16–25 “分析步管理器”对话框

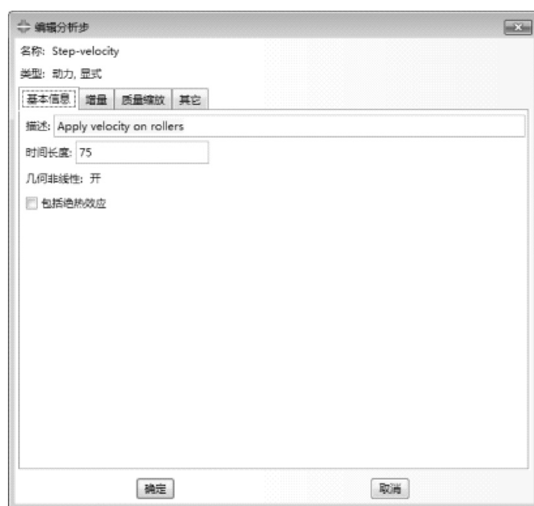


图 16–26 “编辑分析步”对话框

“增量”选项卡设置如图 16–27 所示。“质量缩放”选项卡设置如图 16–28 所示。

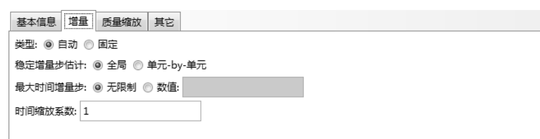


图 16–27 “增量”选项卡



图 16–28 “质量缩放”选项卡

其余保持默认即可，单击“确定”按钮完成分析步的创建。

在“关键字编辑器”中，输入如下命令，完成分析步的定义。

```
** STEP: Step-velocity
**
*Step, name=Step-velocity
Apply velocity on rollers
*Dynamic, Explicit
, 75.
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
** Mass Scaling: Semi-Automatic
**                Whole Model
*Fixed Mass Scaling, factor=1e+06
**
```

单击按钮右侧的按钮，在图 16-29 所示的“场输出请求管理器”中选择“F-Output-1”，单击“编辑”按钮，弹出图 16-30 所示的“编辑场输出请求”对话框，将输出请求改为“A, CSTRESS,LE,PE,PEEQ,RF,RT,S,U,V,”。



图 16-29 “场输出请求管理器”对话框

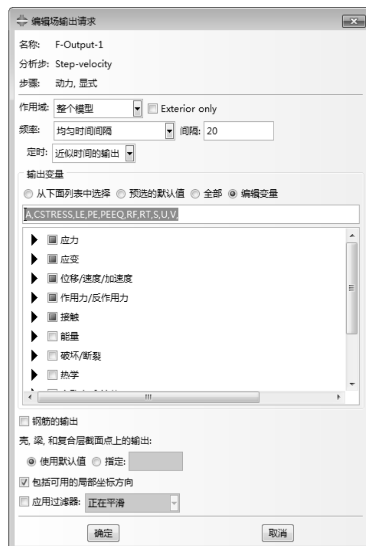


图 16-30 “编辑场输出请求”对话框

单击按钮右侧的按钮，在图 16-31 所示的“历程输出请求管理器”中已完成一个输出请求，再创建一个，选择输出的变量为“ALLIE,ALLKE,”，如图 16-32 所示，单击“确定”按钮完成。

（5）进入“相互作用”模块，开始定义相互作用。首先单击按钮，创建一个相互作用属性如图 16-33 所示，切向行为为“罚”函数，“摩擦系数”为“0.3”。

```
** INTERACTION PROPERTIES
**
```



图 16-31 “历程输出请求管理器”对话框

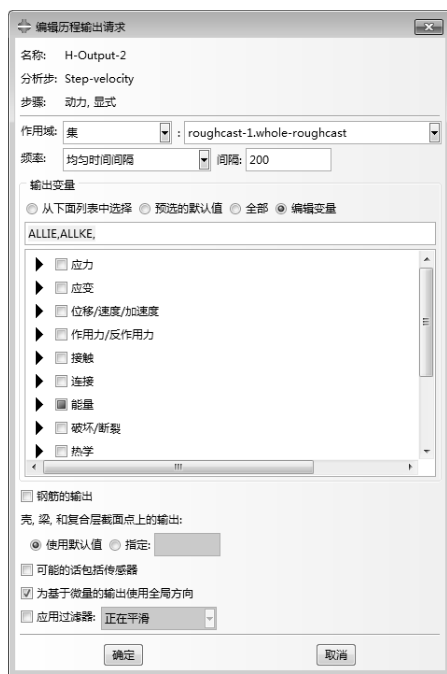


图 16-32 “编辑历程输出请求”对话框

```
**
*Surface Interaction, name=Fric030
*Friction
 0.3,
**
```

使用*Friction 命令也可以定义罚函数。

单击按钮右侧的按钮，在图 16-34 所示的“相互作用管理器”中创建三个 Initial 分析步中的相互作用。



图 16-33 “编辑接触属性”对话框



图 16-34 “相互作用管理器”对话框

如图 16-35 所示，“mould-roughcast”相互作用是芯轴与毛坯的接触，类型为“表面与表面接触（Explicit）”，第一表面为芯轴外表面，第二表面为毛坯内表面如图 16-36 所示。也即“关键字编辑器”中的如下命令。

```
**芯轴与毛坯的相互接触
** Interaction: mould-roughcast
*Contact Pair, interaction=Fric030, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=mould-roughcast
mould-1.mould-outer, roughcast-1.rough-inner
**
```



图 16-35 “mould-roughcast”相互作用

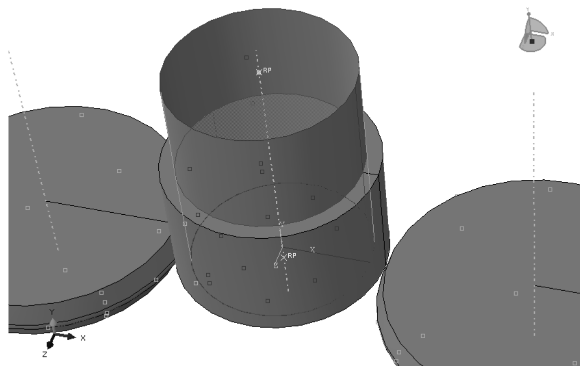


图 16-36 “mould-roughcast”相互作用的表面

如图 16-37 所示，“ring01-roughcast”相互作用是 01 轮与毛坯的接触，类型为“表面与表面接触（Explicit）”，第一表面为 01 轮外表面，第二表面为毛坯外表面如图 16-38 所示。也可以在“关键字编辑器”中使用如下命令。

```
**1 号轮与毛坯的相互接触
** Interaction: ring01-roughcast
*Contact Pair, interaction=Fric030, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=ring01-roughcast
roller01-1.roller01-outer, roughcast-1.rough-outer
**
```

如图 16-39 所示，“ring02-roughcast”相互作用是 02 轮与毛坯的接触，类型为“表面与表面接触（Explicit）”，第一表面为 02 轮外表面，第二表面为毛坯外表面如图 16-40 所示。

或者直接在“关键字编辑器”中直接编辑如下命令。

```
**2 号轮与毛坯的相互接触
** Interaction: ring02-roughcast
*Contact Pair, interaction=Fric030, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=ring02-roughcast
roller02-1.roller02-outer, roughcast-1.rough-outer
**
```



图 16-37 “ring01-roughcast”相互作用

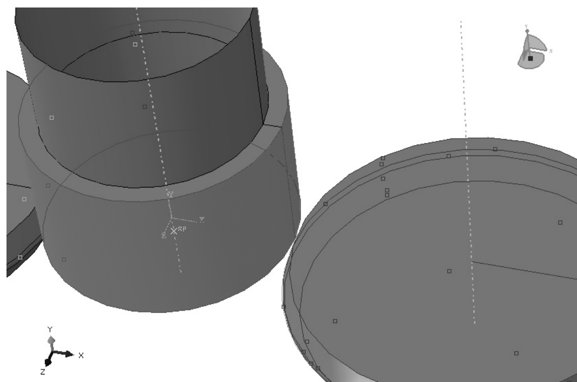


图 16-38 “ring01-roughcast”相互作用的表面



图 16-39 “ring02-roughcast”相互作用

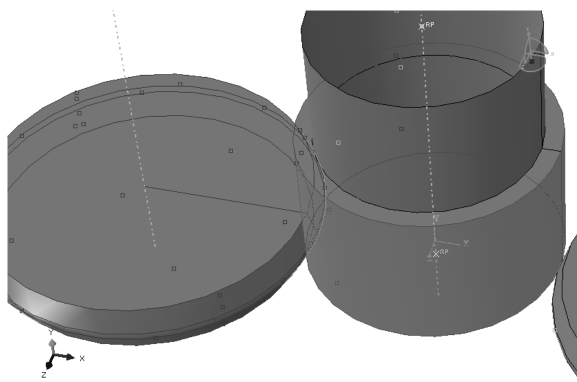


图 16-40 “ring02-roughcast”相互作用的表面

此时完成相互作用定义，在图 16-34 所示的“相互作用管理器”中可看到三个相互作用，下一个分析步直接传递即可，不用再设置。

（6）进入“载荷”模块，如图 16-41 所示的“边界条件管理器”中所示的就是接下来将要创建的边界条件。



图 16-41 “边界条件管理器”对话框

单击按钮，创建“mould-fixed”边界条件，选择的分析步为“Initial”，类型为“位移/转角”，约束所有自由度如图 16-42 所示，约束的对象为芯轴模型的参考点，如图 16-43 所示。

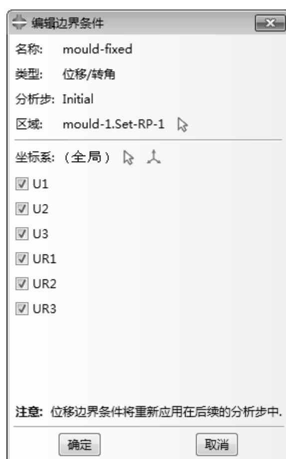


图 16-42 “mould-fixed”边界条件

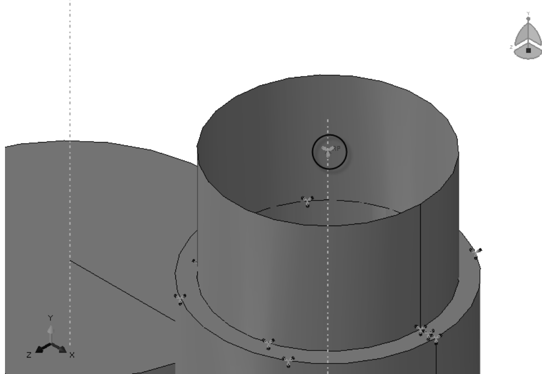


图 16-43 约束点

在“关键字编辑器”中直接输入如下命令也可以定义。

```
** Name: velocity-roller01 Type: 速度/角速度
*Boundary, amplitude=Amp-smooth, type=VELOCITY
roller01-1.Ref-roller01, 1, 1
roller01-1.Ref-roller01, 2, 2, 0.0008
roller01-1.Ref-roller01, 3, 3
roller01-1.Ref-roller01, 4, 4
roller01-1.Ref-roller01, 5, 5, 25.1327
roller01-1.Ref-roller01, 6, 6
```

单击按钮，创建“roughcast-fixed”边界条件，选择的分析步为“Initial”，类型为“位移/转角”，约束所有自由度如图 16-44 所示，约束的对象为毛坯模型的端面，如图 16-45 所示。

在“关键字编辑器”中设置的命令如下。

```
** Name: roughcast-fixed Type: 位移/转角
*Boundary
```

```
roughcast-1.rough-upper, 1, 1
roughcast-1.rough-upper, 2, 2
roughcast-1.rough-upper, 3, 3
roughcast-1.rough-upper, 4, 4
roughcast-1.rough-upper, 5, 5
roughcast-1.rough-upper, 6, 6
** ----------------------------------------------------------------
```

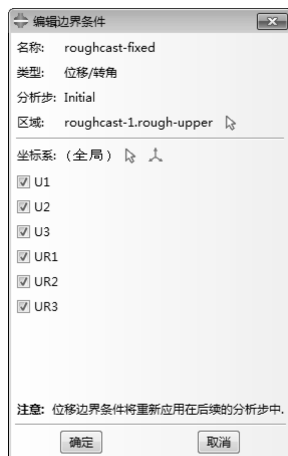


图 16-44 “roughcast-fixed”边界条件

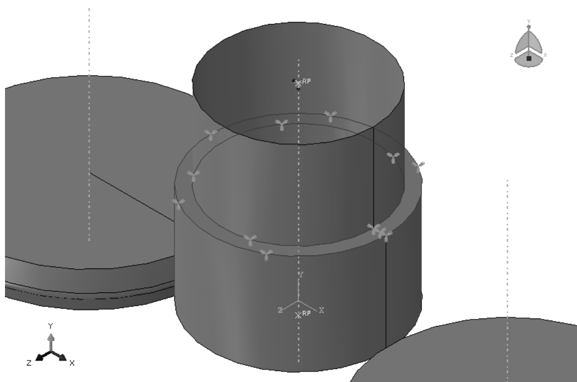


图 16-45 约束面

单击按钮，创建“velocity-rooler01”边界条件，选择的分析步为“Step-velocity”，类型为“速度/角速度”，V2 为“0.0008”，VR2 为“25.1327”，如图 16-46 所示。单击按钮，创建一个平滑分析步类型的幅值，如图 16-47 所示，输入参数，单击“确定”按钮。



图 16-46 “velocity-rooler01”边界条件



图 16-47 幅值设置

幅值也可以预先在“关键字编辑器”中进行如下定义。

```
**创建加载幅值
**斜坡加载，由（0，0）、（0.1，1）两个点确定的直线
```

```
**
*Amplitude, name=Amp-smooth, definition=SMOOTH STEP
0., 0., 0.1, 1.
**
```

如果在“关键字编辑器”中进行过定义，直接在编辑边界条件时即可直接调用。

回到图 16-46 所示的“编辑边界条件”对话框中，选中刚创建的幅值，单击“确定”按钮完成。

也可以使用关键字定义如下。

```
** Name: velocity-rooler01 Type:  速度/角速度
*Boundary, amplitude=Amp-smooth, type=VELOCITY
roller01-1.Ref-roller01, 1, 1
roller01-1.Ref-roller01, 2, 2, 0.0008
roller01-1.Ref-roller01, 3, 3
roller01-1.Ref-roller01, 4, 4
roller01-1.Ref-roller01, 5, 5, 25.1327
roller01-1.Ref-roller01, 6, 6
```

单击按钮，创建“velocity-rooler02”边界条件，选择的分析步为“Step-velocity”，类型为“速度/角速度”，V2 为“0.0008”，VR2 为“25.1327”，如图 16-48 所示。选择上一步创建的幅值，单击“确定”按钮完成边界的设置如图 16-49 所示。



图 16-48 “velocity-rooler02”边界条件

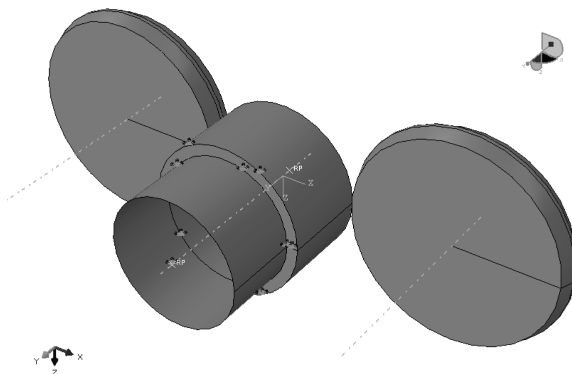


图 16-49 完成边界定义

在“关键字编辑器”中输入如下命令，也可以创建这个边界条件。

```
** Name: velocity-rooler02 Type:  速度/角速度
*Boundary, amplitude=Amp-smooth, type=VELOCITY
roller02-1.Set-roller02, 1, 1
roller02-1.Set-roller02, 2, 2, 0.0008
roller02-1.Set-roller02, 3, 3
roller02-1.Set-roller02, 4, 4
roller02-1.Set-roller02, 5, 5, 25.1327
```

```
roller02-1.Set-roller02, 6, 6
*Adaptive Mesh Controls, name=Ada-1
1., 0., 0.
*Adaptive Mesh, elset=roughcast-1.whole-roughcast, controls=Ada-1, op=NEW
**
```

（7）进入“网格”模块，单击按钮，拾取图 16-50 所示的四个圆，单击中键，在图 16-51 所示的“局部种子”对话框中设置将每条线分为“75”个单元。

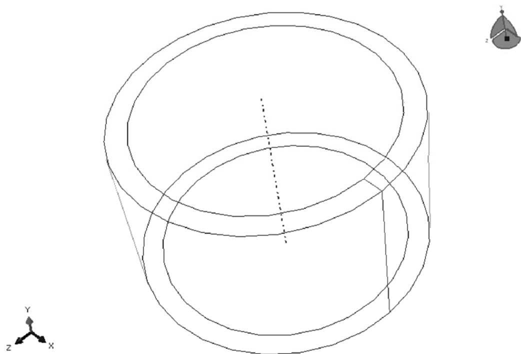


图 16-50　分为 75 份的边



图 16-51 “局部种子”对话框

单击按钮，拾取图 16-52 所示的两条边，单击中键，在图 16-53 所示的“局部种子”对话框中设置将每条线分为“20”个单元。

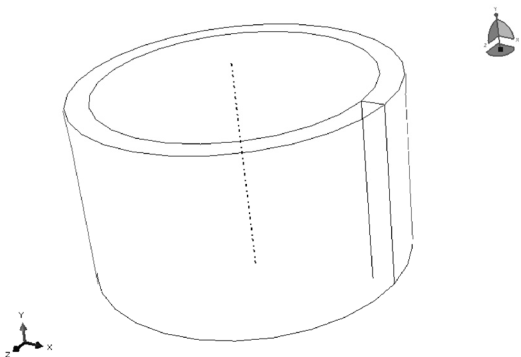


图 16-52　分为 20 份的边



图 16-53 “局部种子”对话框

单击按钮，拾取图 16-54 所示的两条边，单击中键，在图 16-55 所示的“局部种子”对话框中设置将每条线分为“4”个单元。

此时每条边的种子如图 16-56 所示。

单击按钮，弹出图 16-57 所示的“单元类型”对话框，选择 C3D8R 单元（八结点线性六面体单元、减缩积分、沙漏控制）。

然后单击按钮，弹出图 16-58 所示的“网格控制属性”对话框，选择“扫掠”，单击“确定”按钮完成。

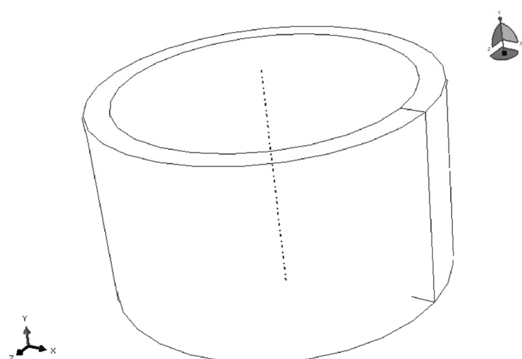


图 16-54　分为 4 份的边



图 16-55 “局部种子”对话框

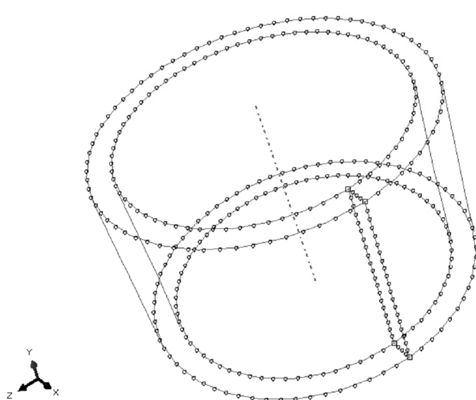


图 16-56　种子



图 16-57 “单元类型”对话框



图 16-58 “网格控制属性”对话框

单击按钮，将毛坯模型进行网格划分，如图 16-59 所示。

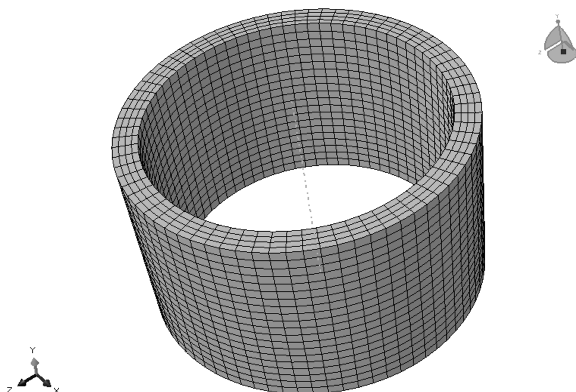


图 16-59　完成网格划分

（8）进入“作业”模块，创建一个作业如图 16-60 所示，在图 16-61 所示的“精度”选项卡中选择精度为“单精度”。



图 16-60　“编辑作业”对话框



图 16-61　精度选项设置

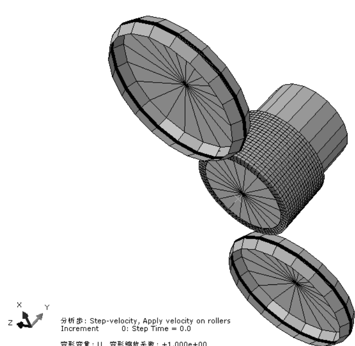
此时操作完成，可以提交计算，建议读者先进行数据检查，以核对是否有重大缺陷。本例提供了 INP 文件的详解，以供参考，读者也可自行编写。

（9）提交计算结束后，可以进行后处理。由于本例计算时间较长，需要耐心等待。在一个 Intel Core i5 2.5GHz CPU、4GB 内存、使用 x64 系统的平台下，计算时间约 4h。

进入“可视化”模块，单击按钮，显示变形图如图 16-62 所示，此时为初始状态。

由于本例计算时间长而使用平台运算能力有限，只进行较为粗略的计算以介绍方法，如读者拥有优秀的计算平台与充裕的时间，可将进给速度调小，即可以得到更为接近实际的结果。

图 16-63 所示为 INC=05 时的变形图。



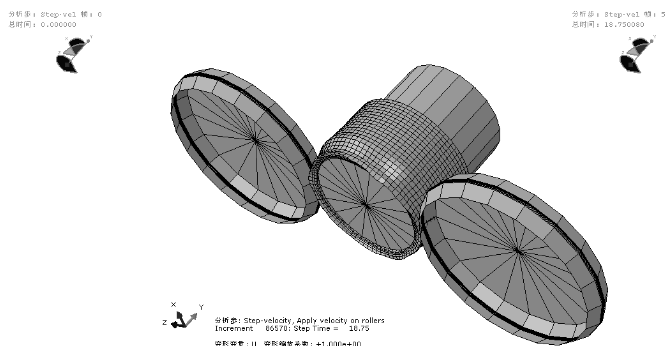
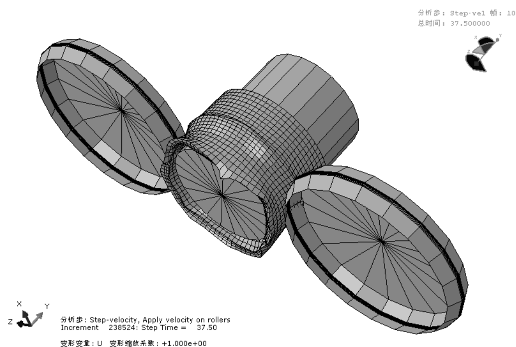


图 16-62　变形图，INC=00

图 16-63　变形图，INC=05

图 16-64 所示为 INC=10 时的变形图。图 16-65 所示为 INC=15 时的变形图。



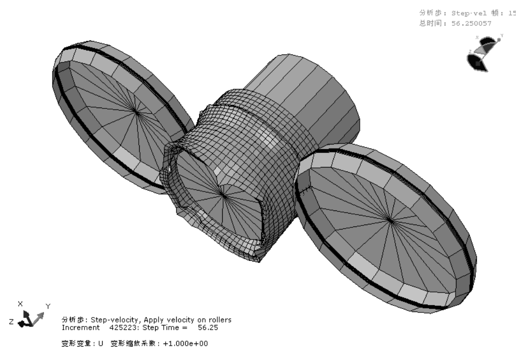
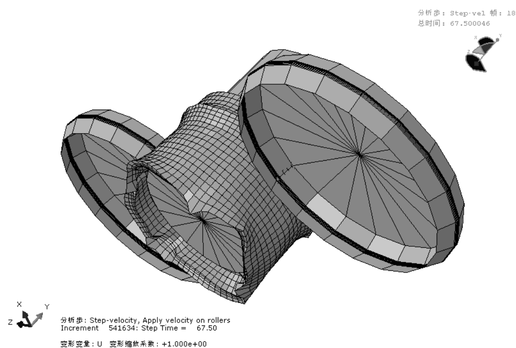


图 16-64　变形图，INC=10

图 16-65　变形图，INC=15

图 16-66 所示为 INC=18 时的变形图。图 16-67 所示为 INC=20 时的变形图。



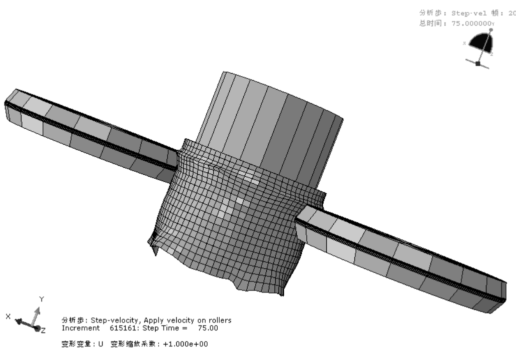


图 16-66　变形图，INC=18

图 16-67　变形图，INC=20

单击按钮，显示应力云图如图 16-68 所示。图 16-69 所示为 INC=05 时的应力云图。图 16-70 所示为 INC=10 时的应力云图。图 16-71 所示为 INC=15 时的应力云图。

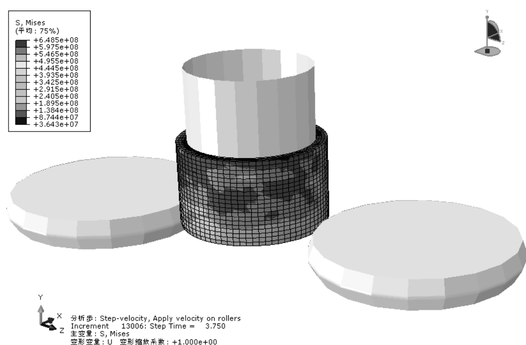


图 16-68 应力云图，INC=01

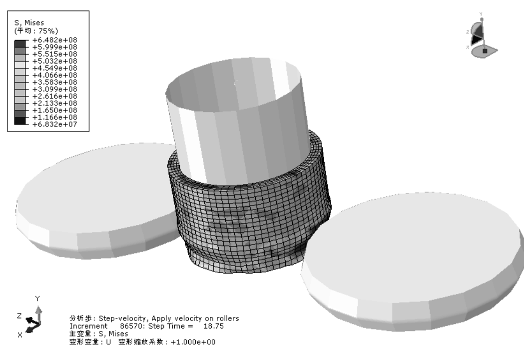


图 16-69 应力云图，INC=05

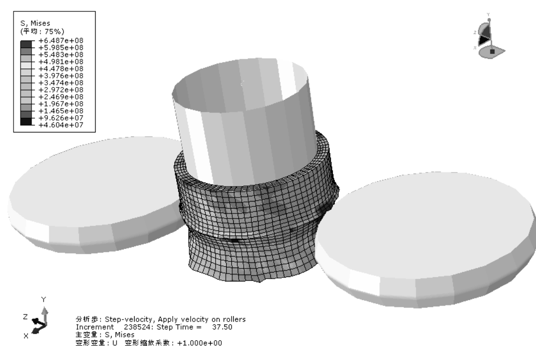


图 16-70 应力云图，INC=10

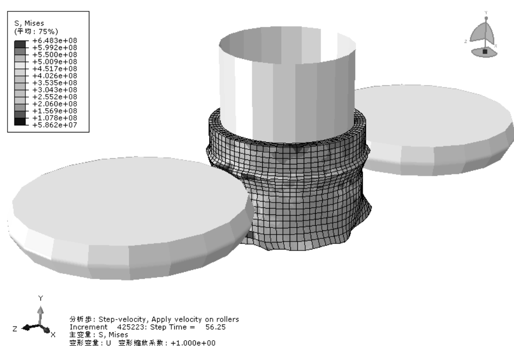


图 16-71 应力云图，INC=15

图 16-72 所示为 INC=18 时的应力云图。图 16-73 所示为 INC=20 时的应力云图。

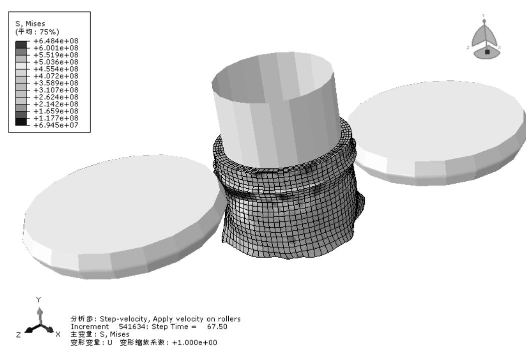


图 16-72 应力云图，INC=18

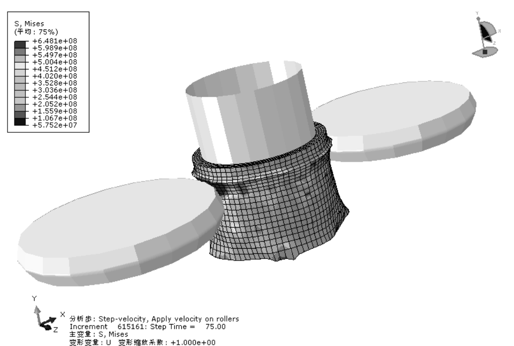


图 16-73 应力云图，INC=20

在 主 LE Max. Principa 工具栏中，将变量调整为“LE”，即对数应变，显示对数应变云图如图 16-74 所示。图 16-75 所示为 INC=05 时的对数应变云图。

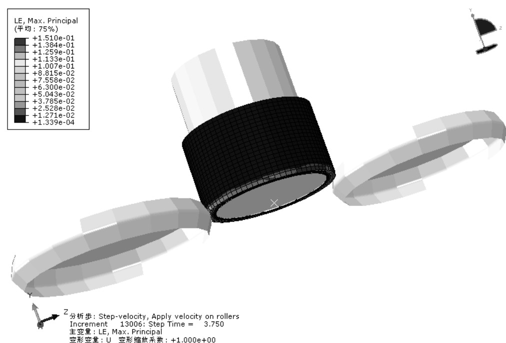


图 16-74 对数应变云图，INC=01

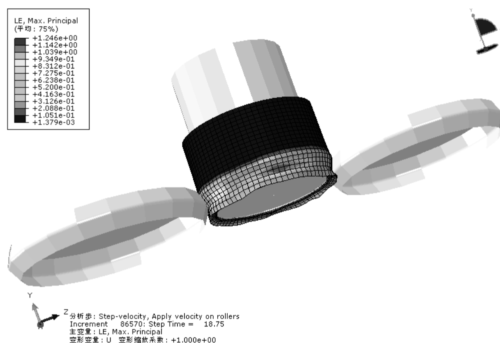


图 16-75 对数应变云图，INC=05

图 16-76 所示为 INC=10 时的对数应变云图。图 16-77 所示为 INC=15 时的对数应变云图。

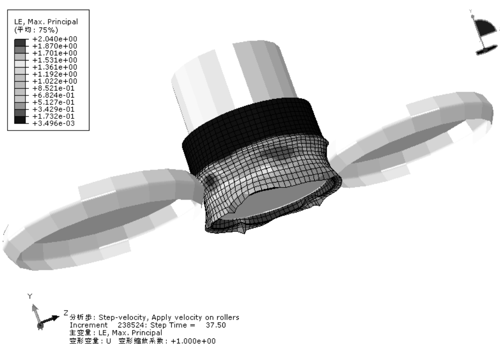


图 16-76 对数应变云图，INC=10

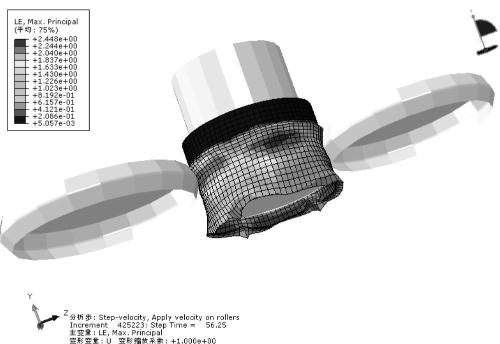


图 16-77 对数应变云图，INC=15

图 16-78 所示为 INC=18 时的对数应变云图。图 16-79 所示为 INC=20 时的对数应变云图。

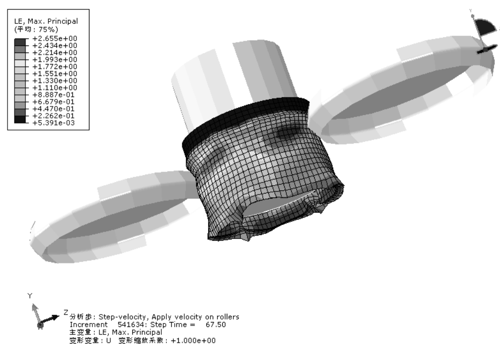


图 16-78 对数应变云图，INC=18

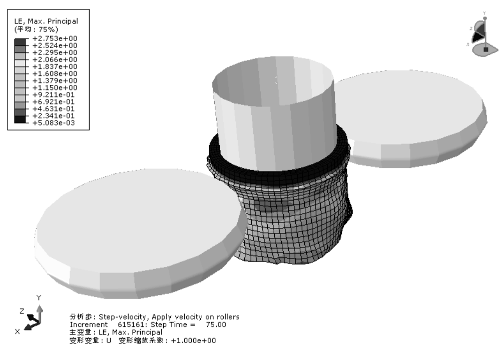


图 16-79 对数应变云图，INC=20

在 主 PE Max. Principal 工具栏中，将变量调整为“PE”，即塑性应变，显示塑性应变云图如图 16-80 所示。图 16-81 所示为 INC=05 时的塑性应变云图。

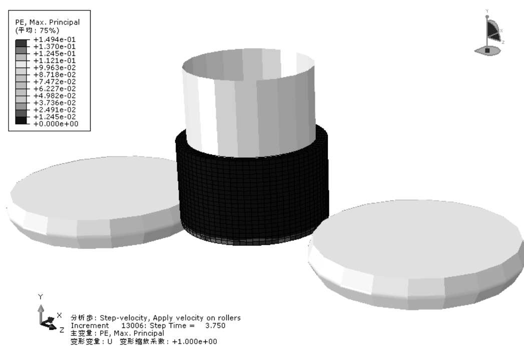


图 16-80 塑性应变云图，INC=01

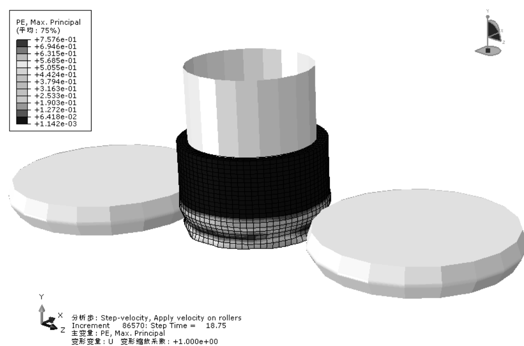


图 16-81 塑性应变云图，INC=05

图 16-82 所示为 INC=10 时的塑性应变云图。图 16-83 所示为 INC=15 时的塑性应变云图。

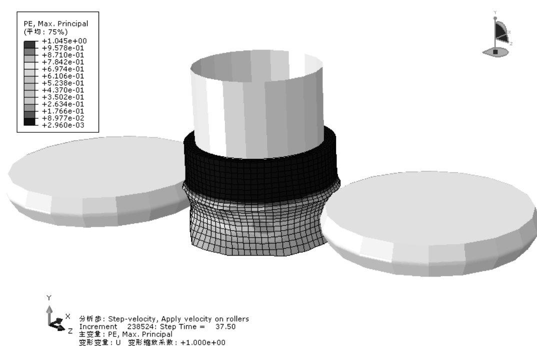


图 16-82 塑性应变云图，INC=10

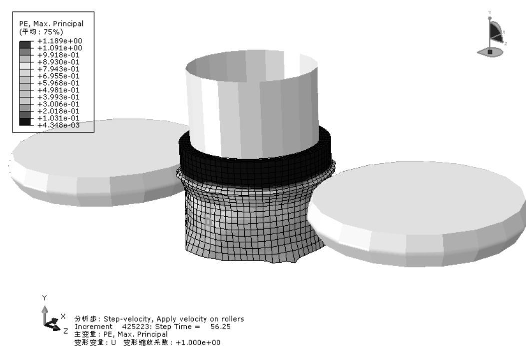


图 16-83 塑性应变云图，INC=15

图 16-84 所示为 INC=18 时的塑性应变云图。图 16-85 所示为 INC=20 时的塑性应变云图。

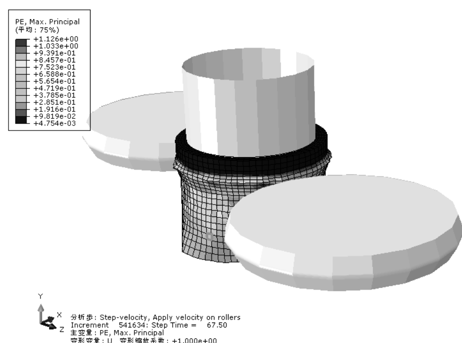


图 16-84 塑性应变云图，INC=18

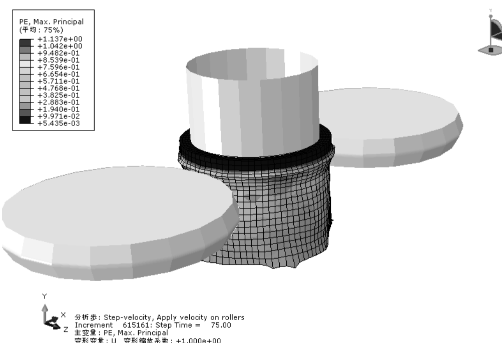


图 16-85 塑性应变云图，INC=20

执行“结果→历程输出”命令，弹出图 16-86 所示的“历程输出”对话框。



图 16-86 “历程输出”对话框

选择其中的项目，可以输出相应的历程曲线。如图 16-87 所示为 ALLAE（伪应变能）曲线。图 16-88 所示为模型 ALLWK（对外做工）曲线。

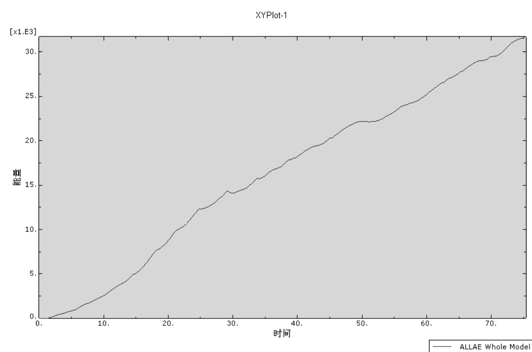


图 16-87　ALLAE（伪应变能）曲线

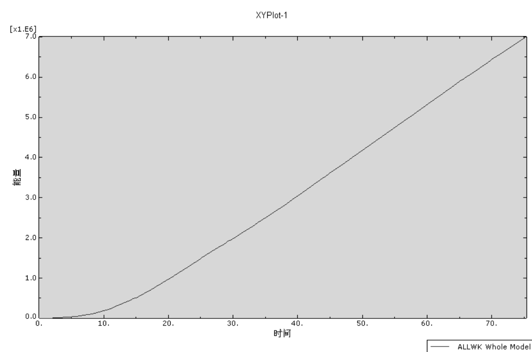


图 16-88　ALLWK（对外做工）曲线

图 16-89 所示为模型 ALLFD（摩擦耗散）曲线。图 16-90 所示为模型与毛坯的 ALLIE（内能）曲线。

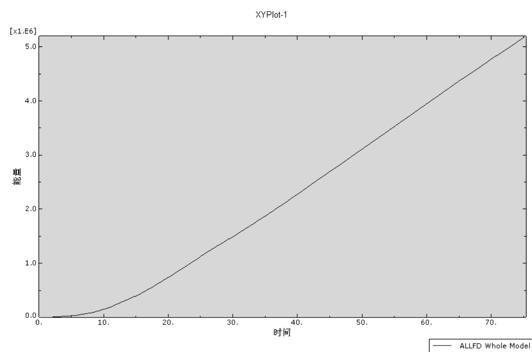


图 16-89　ALLFD（摩擦耗散）曲线

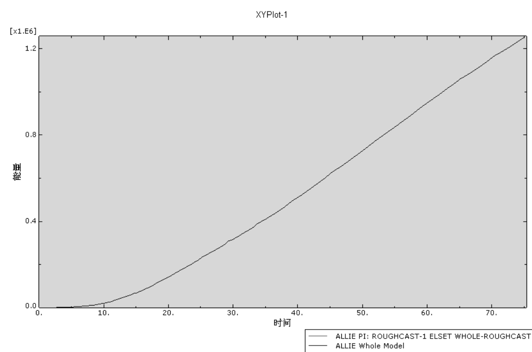


图 16-90　ALLIE（内能）曲线

图 16-91 所示为模型与毛坯的 ALLKE（动能）曲线。图 16-92 所示为模型的 ALLVD（黏性耗散）与 ALLPD（弹性耗散）对比曲线。

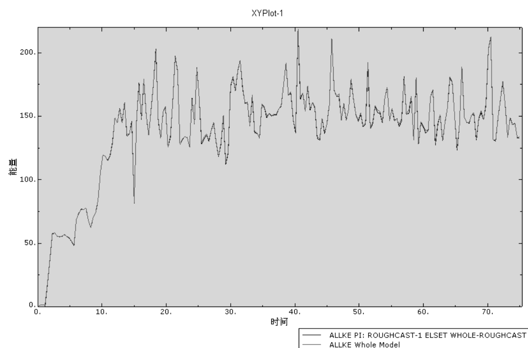


图 16-91　ALLKE（动能）曲线

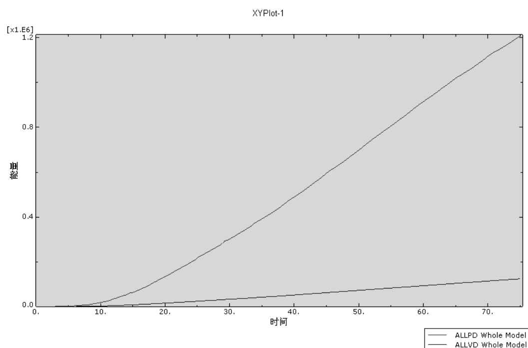


图 16-92　ALLVD（黏性耗散）与 ALLPD（弹性耗散）对比曲线

图 16-93 所示为模型的 ETOTAL（总能量）与 ALLSE（应变能）曲线。

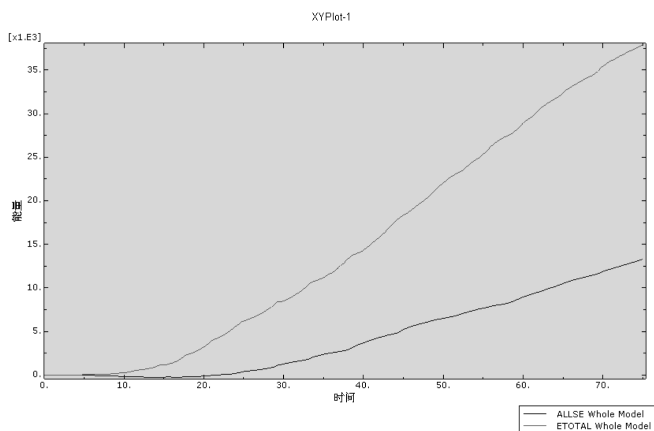


图 16-93　ETOTAL（总能量）与 ALLSE（应变能）曲线

16.2.2　ABAQUS 仿真实例——铆接

利用轴向力，将零件铆钉孔内钉杆镦粗并形成钉头，使多个零件相连接的方法，称为铆接。根据结合件的特点，可以分类如下。

■ 活动铆接。结合件可以相互转动，不是刚性连接。

例如：剪刀，钳子。

■ 固定铆接。结合件不能相互活动，属于刚性连接。

也即强固铆接（坚固铆接），应用于结构需要有足够的强度、承受强大作用力的地方。

■ 密封铆接。铆缝严密，不漏气体、液体，属于刚性连接，分紧密铆接与强密铆接。

紧密铆接，应用于低压容器装置，这种铆接只能承受很小的均匀压力，但要求接缝处非常严密，以防止渗漏，如气筒、水箱和油罐等；强密铆接（坚固紧密铆接），这种铆接不但能承受很大的压力，而且要求接缝非常紧密，即使在较大压力下，液体或气体也保持不渗漏。

也可以按铆接方法进行分类。

- 冷铆铆接时，铆钉不需加热，直接镦出铆合头，直径在 8mm 以下的钢制铆钉都可以用冷铆方法铆接。采用冷铆时铆钉的材料必须具有较高的塑性。
- 热铆是把整个铆钉加热到一定温度，然后再铆接。因铆钉受热后塑性好，容易成型，而且冷却后铆钉杆收缩，还可加大结合强度。
- 混合铆在铆接时，只把铆钉的铆合头端部加热。对于细长的铆钉，采用这种方法，可以避免铆接时铆钉杆的弯曲。

铆接的工艺过程有钻孔、锪孔、去毛刺、插入铆钉、顶模（顶把）顶住铆钉、旋铆机铆成型（或手工镦紧、镦粗、铆成、罩形）。

本例将分析如图 16-94 所示的工件的铆接过程。

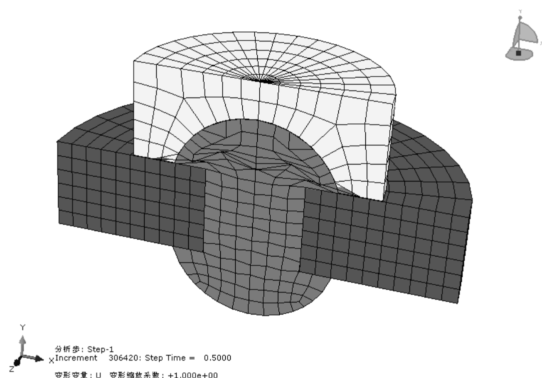


图 16-94 铆接工件模型

图 16-94 中，铆钉的直径为 6mm，钉头直径为 11mm、高为 3.9mm，铆钉杆长为 15mm，工件厚度为 6mm，铆钉孔直径为 6.2mm，铆钉材料为钢，弹性模量为 200GPa，泊松比为 0.3，密度为 7800 kg/m^3，塑性材料参数见表 16-3。

表 16-3 塑性材料参数

屈服应力	塑性应变
4.18E+08	0
5.00E+08	0.01581
6.05E+08	0.02983
6.95E+08	0.056
7.80E+08	0.095
8.29E+08	0.15
8.82E+08	0.25
9.08E+08	0.35
9.21E+08	0.45
9.32E+08	0.55
9.55E+08	0.65
9.88E+08	0.75
1.04E+09	0.85

（1）启动 ABAQUS/CAE，开始建模。进入“部件”模块，单击按钮，创建一个轴对称可变形壳实体，单击“继续”，进入草图界面绘制图 16-95 所示的草图。

连续单击中键，完成部件如图 16-96 所示。

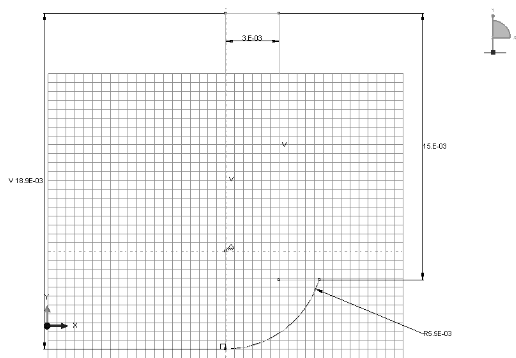


图 16-95　截面草图

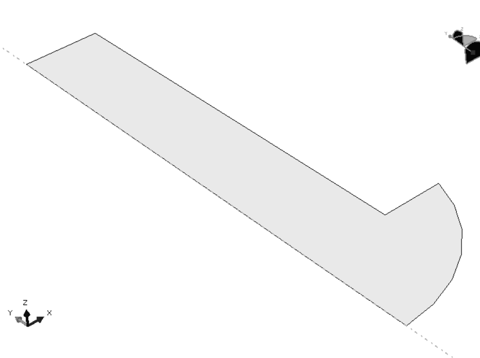


图 16-96　铆钉

单击按钮，创建一个轴对称可变形壳实体，单击“继续”，进入草图界面绘制图 16-97 所示的草图。连续单击中键，完成部件如图 16-98 所示。

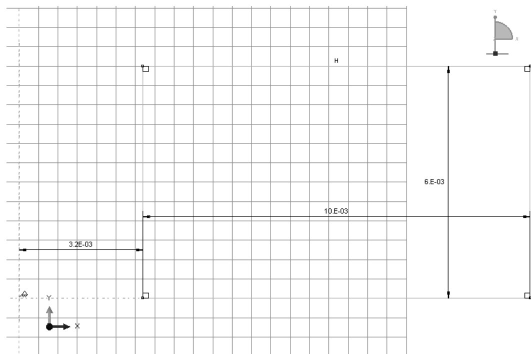


图 16-97　截面草图

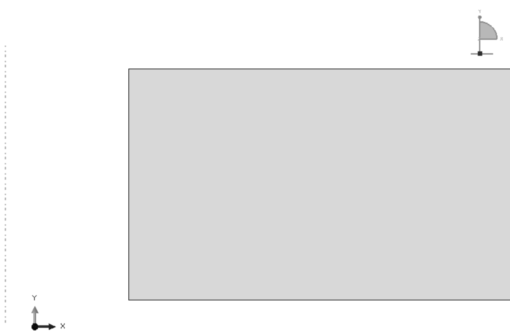


图 16-98　工件

单击按钮，创建一个轴对称可变形壳实体，单击“继续”，进入草图界面绘制图 16-99 所示的草图。连续单击中键，完成部件如图 16-100 所示。

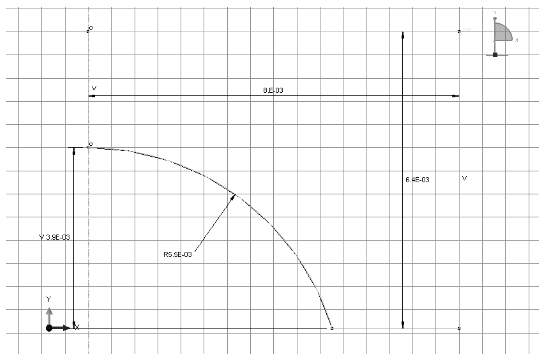


图 16-99　截面草图

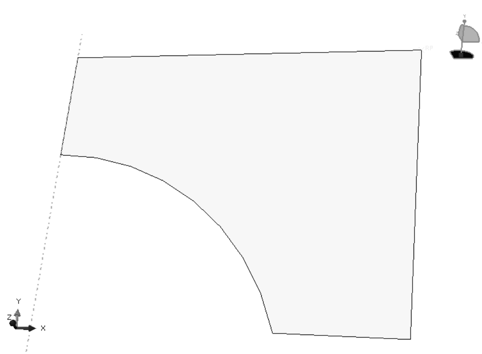


图 16-100　工具

完成部件的创建，此时应有如图 16-101“部件管理器”所示的三个部件。



图 16-101 “部件管理器”对话框

（2）完成部件的创建，开始定义材料。本例中所有材料均为可变形体，但工具与工件的强度远远大于铆钉，可以得到接近于刚性的效果。

单击按钮，创建图 16-102 所示的两个材料。如图 16-103 所示为高强度材料的设置，用于工具及工件，弹性模量“1E13”，泊松比为“0.4”，密度为“8000”。



图 16-102 “材料管理器”对话框



图 16-103 高强材料—RIGID

使用命令创建方法如下。

```
**定义一个名为 RIGID 的材料
**
*Material, name=RIGID
```



```
**
**密度
**
*Density
8000.,
**
**弹性参数
**
*Elastic
 1e+13, 0.4
**
```

如图 16-104 所示为 Steel 材料的设置。图 16-105 所示为密度参数的设置。Steel 材料使用命令创建的方法如下。

```
**定义一个名为 Steel 的材料
**
*Material, name=Steel
**
**密度
**
*Density
7800.,
**
**弹性参数
**
*Elastic
 2e+11, 0.3
**
**塑性材料参数
**
*Plastic
 4.18e+08,         0.
 5e+08, 0.01581
 6.05e+08, 0.02983
 6.95e+08,     0.056
   7.8e+08,     0.095
 8.29e+08,       0.15
 8.82e+08,       0.25
 9.08e+08,       0.35
 9.21e+08,       0.45
 9.32e+08,       0.55
 9.55e+08,       0.65
 9.88e+08,       0.75
 1.04e+09,       0.85
**
```



图 16-104　Steel 材料设置



图 16-105　密度设置

图 16-106 所示为塑性参数的设置。图 16-107 所示为弹性材料参数的设置。



图 16-106　塑性参数设置



图 16-107　弹性参数设置

完成材料定义后，创建两个实体截面，分别对应两种材料，将 Steel 材料对应的截面指派给铆钉，将 RIGID 材料对应的截面指派给工具与工件。

（3）完成截面指派，进入“装配”模块。单击按钮，将三个部件实例化如图 16-108 所示。单击按钮，调整实例位置。

工具上表面距铆钉头顶点为-0.0224，工件下表面与铆钉头底面贴合，水平方向已是对齐的不用调整。调整后的实例位置如图 16-109 所示。

在“关键字编辑器”中直接输出如下命令，可以直接将实例放置到安装位置。

```
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Rivet-1, part=Rivet
*End Instance
**
```

```
*Instance, name=Workpart-1, part=Workpart
0., -0.0016, 0.
*End Instance
**
*Instance, name=Tool-1, part=Tool
 -8.67361737988404e-19, 0.0089, 0.
*End Instance
**
**创建实例完成
**
```

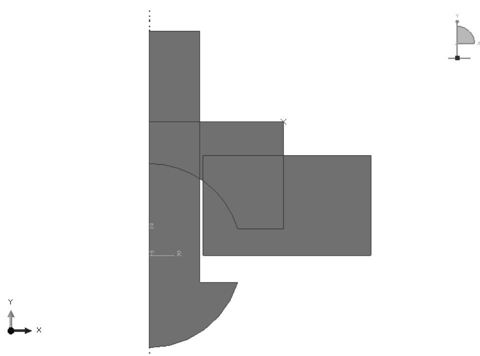


图 16-108 实例化

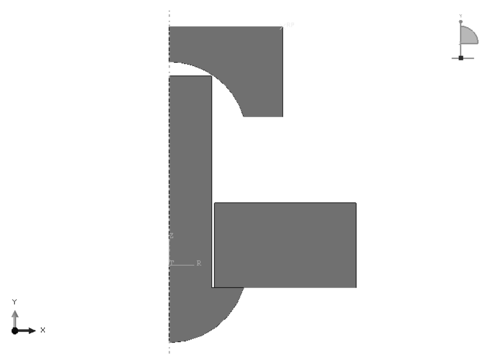


图 16-109 装配完成

（4）进入“分析步”模块。单击按钮，创建一个显式动力分析步，如图 16-110 所示。在图 16-111 所示的“编辑分析步”对话框中，设置“时间长度”为“0.5”，“几何非线性”默认为“开”。



图 16-110 “分析步管理器”对话框



图 16-111 “编辑分析步”对话框

分析步的设置如以下命令所示。

```
** STEP: Step-1
**
*Step, name=Step-1
*Dynamic, Explicit
, 0.5
*Bulk Viscosity
0.06, 1.2
** Mass Scaling: Semi-Automatic
**                    Whole Model
*Fixed Mass Scaling, factor=10000.
**
```

单击按钮，创建场输出请求，如图 16-112 所示，定义输出的量为“A,CSTRESS,EVF, LE,PE,PEEQ,PEEQVAVG,PEVAVG,RF,S,SVAVG,U,V,”。

单击按钮，创建历程输出请求，如图 16-113 所示，定义输出的量为“ALLAE,ALLCD, ALLDMD,ALLFD,ALLIE,ALLKE,ALLPD,ALLSE,ALLVD,ALLWK,ETOTAL,”。

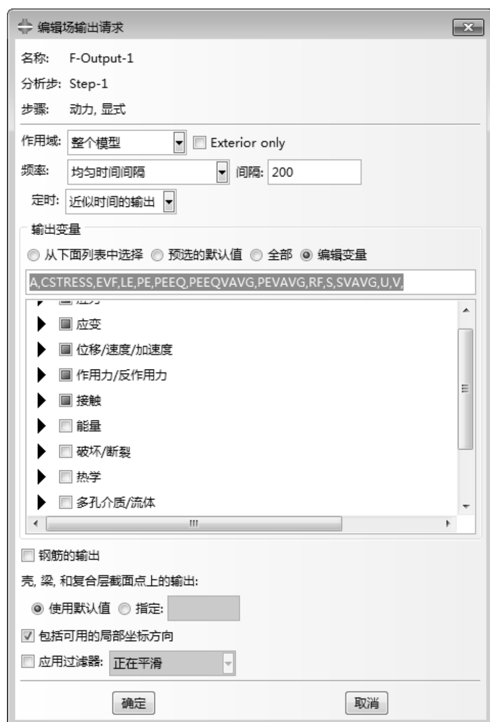


图 16-112 “编辑场输出请求”对话框



图 16-113 “编辑历程输出请求”对话框

（5）进入“相互作用”模块。单击按钮，按图 16-114 创建一个相互作用属性，需要定义切向与法向行为。如图 16-115 所示为切向行为设置，定义罚函数，“摩擦系数”为“0.2”。

如图 16-116 所示为法向行为设置，定义为“硬接触”。



图 16-114 “编辑接触属性”对话框

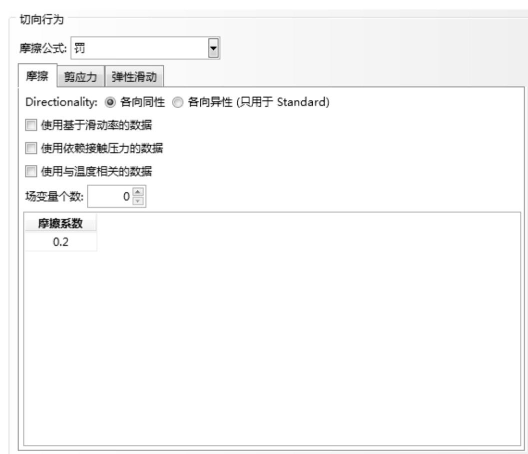


图 16-115 切向行为设置



图 16-116 法向行为设置

在“关键字编辑器”中，输出以下命令，完成相互作用属性创建，在“相互作用”模块中可以直接调用这一属性。

```
** INTERACTION PROPERTIES
**
**
*Surface Interaction, name=IntProp-1
*Friction
 0.2,
*Surface Behavior, no separation, pressure-overclosure=HARD
**
```

单击按钮，创建图 16-117 所示的三个相互作用，类型均为“表面与表面接触”。



图 16-117 相互作用管理器

第一个相互作用“Int-1”为铆钉与工具的接触按图 16-118 进行设置，选择“运动接触法”与上一步定义的相互作用属性，接触面如图 16-119 所示。



图 16-118 “编辑相互作用”对话框



图 16-119 接触面

注意本例中使用“关键字编辑器”与界面操作的不同。如果使用“关键字编辑器”，以下命令应定义在分析步之中。

```
**Int-1，铆钉与工具的接触，运动接触
**
** Interaction: Int-1
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Int-1
_PickedSurf31, _PickedSurf15
** Contact Controls for Interaction: Int-1
*Contact Controls, cpset=Int-1, scale penalty=1.5, warp cut off=5., reset
**
```

第二个相互作用“Int-2”为铆钉与工件的接触按图 16-120 进行设置，选择“运动接触法”与上一步定义的相互作用属性，接触面如图 16-121 所示。



图 16-120 “编辑相互作用”对话框

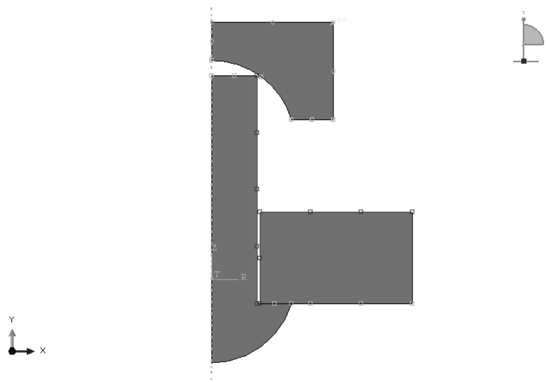


图 16-121 接触面

与 Int-1 类似，以下命令应定义在分析步中。

```
**Int-2，铆钉与工件的接触，运动接触
**
** Interaction: Int-2
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Int-2
_PickedSurf21, _PickedSurf17
** Contact Controls for Interaction: Int-2
*Contact Controls, cpset=Int-2, scale penalty=1.5, warp cut off=5., reset
**
```

第三个相互作用“Int-3”为铆钉头与工件的接触按图 16-122 进行设置，选择“运动接触法”与上一步定义的相互作用属性，接触面如图 16-123 所示。



图 16-122 “编辑相互作用”对话框

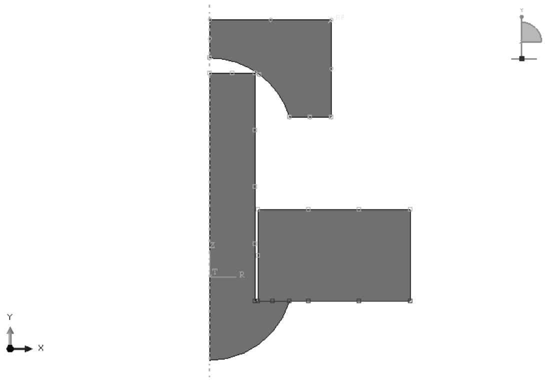


图 16-123 接触面

这个相互作用的命令也是创建在 STEP 块中的，注意不要混淆位置。

```
**Int-3，工件与工具的接触，运动接触
**
** Interaction: Int-3
*Contact Pair, interaction=IntProp-1, mechanical constraint=KINEMATIC, cpset=Int-3
_PickedSurf18, _PickedSurf19
** Contact Controls for Interaction: Int-3
*Contact Controls, cpset=Int-3, scale penalty=1.5, warp cut off=5., reset
**
```

执行“相互作用→接触控制→创建”命令，创建一个图 16-124 所示的接触控制。勾选“快速本地跟踪”，输入“罚刚度因子”为“1.5”，“翘曲检查增量”为“20”，“用于区分高度翘曲小面的角度标准（度）”为“5”，单击“确定”完成。

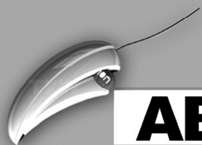




图 16-124 “编辑接触控制”对话框

在图 16-118、图 16-120、图 16-122 中的“编辑相互作用”对话框中均选择上述接触控制，所有的相互作用均选择 Initial 分析步，但在命令中，依然是在第一个分析步中定义而不是初始分析步中。

在上述创建相互作用过程中的*Contact Controls 命令即用于接触控制的定义，cpset 参数用于选择使用的相互作用，scale penalty 参数指定了罚刚度因子，warp cut off 参数定义了用于区分高度翘曲小面的角度标准，角度的单位是度。

单击按钮，创建一个刚体约束如图 16-125 所示，“区域类型”为“体（单元）”，选择图 16-126 所示的区域及参考点。



图 16-125 “编辑约束”对话框

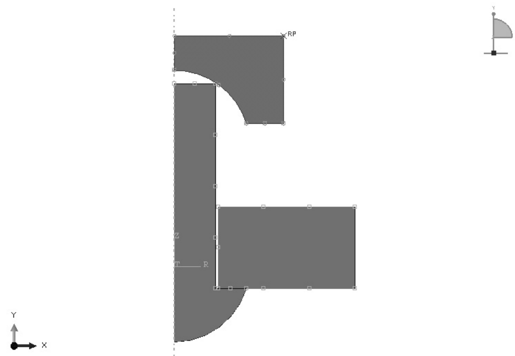


图 16-126 刚体约束

（6）完成相互作用定义，进入“载荷”模块，如图 16-127 所示，将定义四个边界条件以模拟加载的过程，在进行任何有限单元法的分析时，应尽量使用位移加载的方式。

第一个边界条件 BC-1 定义在 Initial 分析步，按图 16-128 设置，类型为“对称/反对称/完全固定”，约束的边如图 16-129 所示，选择“XSYMM（U1=UR2=UR3=0）”，单击“确定”完成。



图 16-127 “编辑约束”对话框



图 16-128　边界条件 BC-1 设置



图 16-129　约束的边

也可以把以下命令插入在 STEP 块之前。

```
**BC-1，用于固定对称边
** Name: BC-1 Type:  对称/反对称/完全固定
*Boundary
_PickedSet12, XSYMM
**
```

第二个边界条件 BC-2 定义在 Initial 分析步，按图 16-130 设置，类型为“位移/转角”，约束的边如图 16-131 所示，选择“U1”、“U2”、“UR3”，单击“确定”完成。

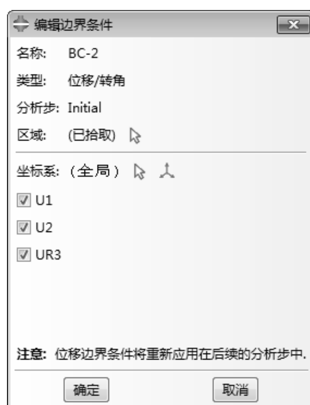


图 16-130　边界条件 BC-2 设置



图 16-131　约束的边

也可以把以下命令插入在 BC-1 的代码块之后。

```
**BC-2，用于防止铆钉头移动
**
** Name: BC-2 Type:  位移/转角
*Boundary
_PickedSet11, 1, 1
_PickedSet11, 2, 2
```

```
_PickedSet11, 6, 6
**
```

第三个边界条件 BC-3 定义在 Initial 分析步，按图 16-132 设置，类型为“位移/转角”，约束的边如图 16-133 所示，选择“U1”、“U2”、“UR3”，单击“确定”完成。

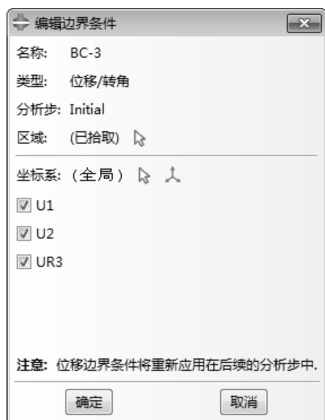


图 16-132　边界条件 BC-3 设置



图 16-133　约束的边

以下命令定义在 BC-2 的代码块之后。

```
**BC-3，用于保证铆钉头与工件始终贴合
**
** Name: BC-3 Type: 位移/转角
*Boundary
_PickedSet20, 1, 1
_PickedSet20, 2, 2
_PickedSet20, 6, 6
** ----------------------------------------------------------------
```

第四个边界条件 BC-4 定义在 Step-1 分析步，按图 16-134 设置，类型为“位移/转角”，约束的边如图 16-135 所示，选择“U1”、“U2”、“UR3”，输入 U2 为“-0.0061”。也可以直接将以下命令插入在 STEP 块中。

```
**BC-4，用于控制工件位移
**
** Name: BC-4 Type: 位移/转角
*Boundary, amplitude=Amp-1
_PickedSet13, 1, 1
_PickedSet13, 2, 2, -0.0061
_PickedSet13, 6, 6
**
```



图 16-134　边界条件 BC-3 设置

单击按钮，创建一个图 16-136 所示的幅值，输入图中的幅值曲线。



图 16-135 约束的边

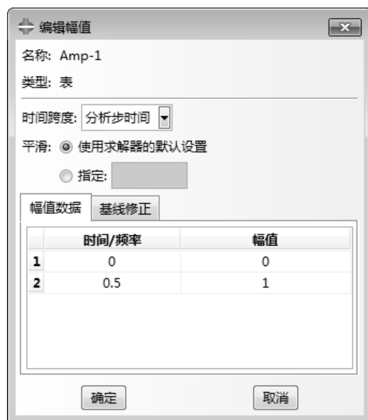


图 16-136 “编辑幅值”对话框

如果预先将以下命令插入在“关键字编辑器”中，则可以直接调用这个幅值。

```
*Amplitude, name=Amp-1
0., 0., 0.5, 1.
**
```

在图 16-134 所示的“编辑边界条件”对话框中选择这个幅值，单击“确定”完成全部边界条件的定义。

（7）进入“网格”模块，在 对象: 装配 部件: Rivet 工具中，选择对象为“部件”，选择“Rivet”部件，单击按钮，弹出图 16-137 所示的“全局种子”对话框，输入全局种子的“近似全局尺寸”为“0.001”，单击“确定”，完成铆钉布种如图 16-138 所示。



图 16-137 “全局种子”对话框

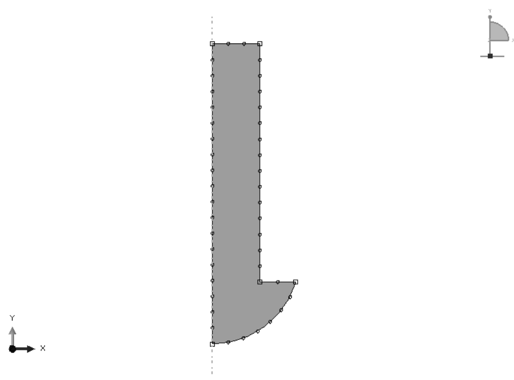


图 16-138 布种

单击按钮，弹出图 16-139 所示的“网格控制属性”对话框，选择网格划分技术为“自由”。

单击按钮，弹出图 16-140 所示的“单元类型”对话框，选择 CAX4R 单元（四结点双线性轴对称四边形单元、减缩积分、沙漏控制）。

完成后单击按钮进行划分，划分的网格如图 16-141 所示。



图 16-139 “网格控制属性”对话框



图 16-140 “单元类型”对话框

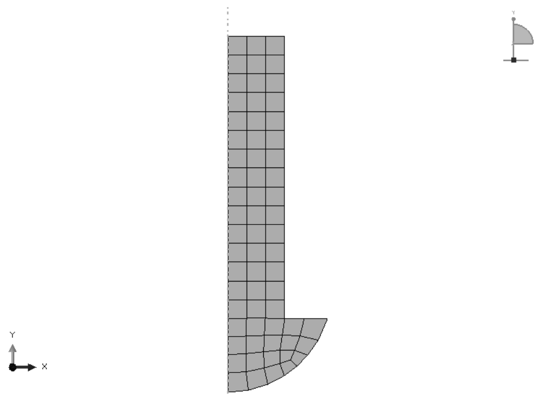


图 16-141 网格（铆钉）

对其余两个部件参考上述操作，进行同样的设置，划分完成网格，如图 16-142、图 16-143 所示。

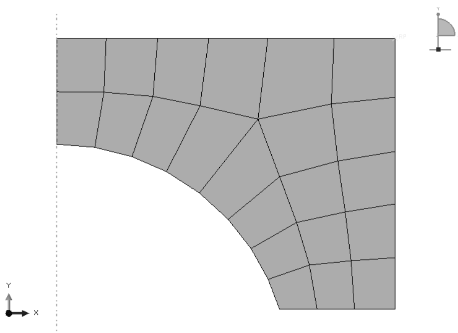


图 16-142 网格（工具）

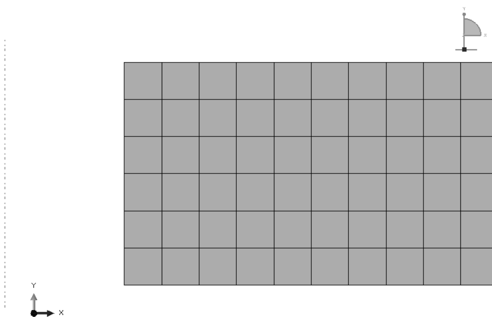


图 16-143 网格（工件）

（8）完成网格划分后，进入“作业”模块，单击按钮，创建一个图 16-144 所示的作业，在“并行”选项卡中选择要调用的 CPU 参数，单击“确定”，即可提交计算。



图 16-144 编辑作业

本例提供了完整 INP 文件，读者可以参考代码，自行编写。

（9）完成计算后，即可进行后处理。进入“可视化”模块。

单击按钮，显示模型的变形图，图 16-145 所示为 INC=25 时的变形图。图 16-146 所示为 INC=60 时的变形图。

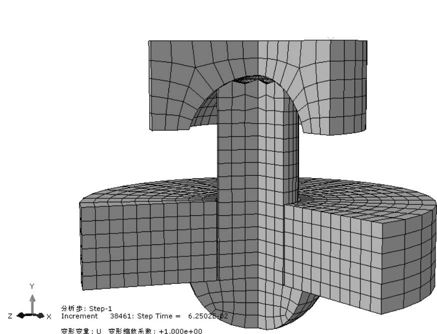


图 16-145 变形图，INC=25

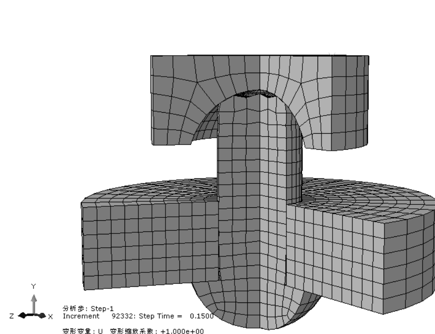


图 16-146 变形图，INC=60

图 16-147 所示为 INC=110 时的变形图。图 16-148 所示为 INC=150 时的变形图。

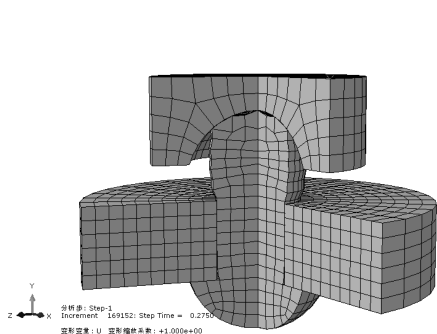


图 16-147 变形图，INC=110

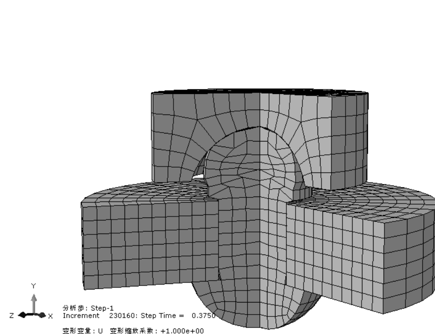


图 16-148 变形图，INC=150

图 16-149 所示为 INC=180 时的变形图。图 16-150 所示为 INC=200 时的变形图。

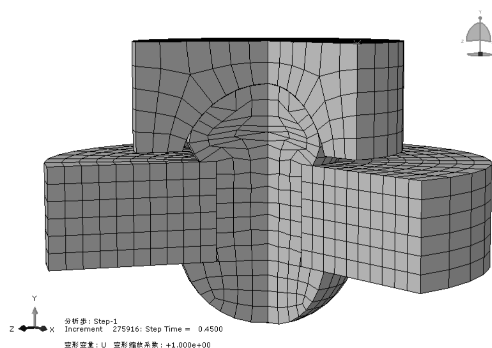


图 16-149 变形图，INC=180

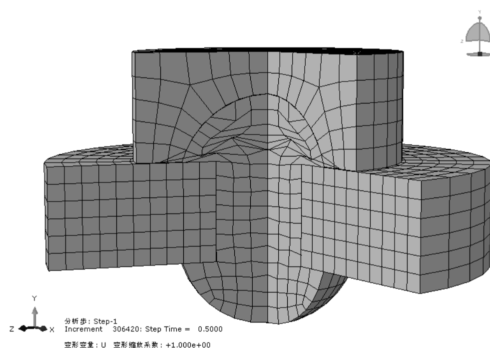


图 16-150 变形图，INC=200

在 主 S Mises 工具中，将变量改为“S”（Mises 应力），显示应力云图。图 16-151 所示为 INC=25 时的应力云图。图 16-152 所示为 INC=60 时的应力云图。

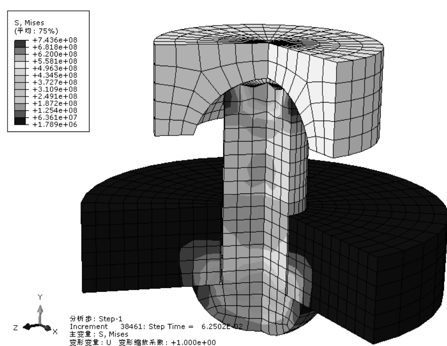


图 16-151 应力云图，INC=25

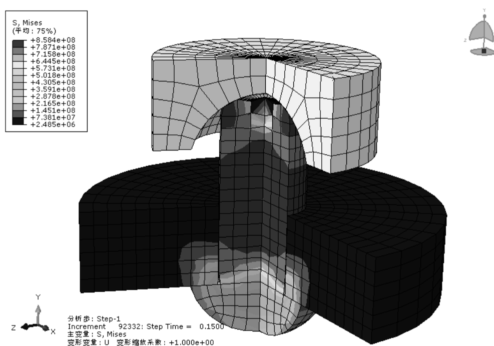


图 16-152 应力云图，INC=60

图 16-153 所示为 INC=110 时的应力云图。图 16-154 所示为 INC=150 时的应力云图。

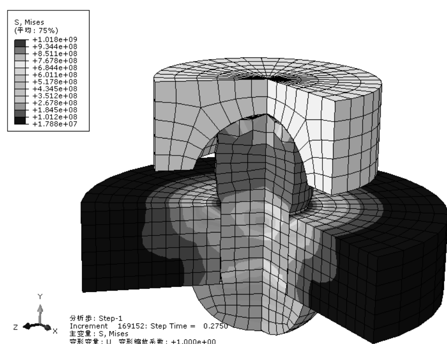


图 16-153 应力云图，INC=110

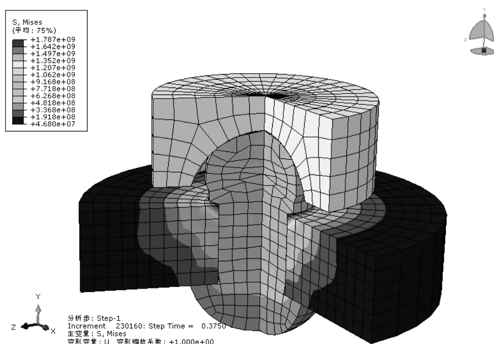


图 16-154 应力云图，INC=150

图 16-155 所示为 INC=180 时的应力云图。图 16-156 所示为 INC=200 时的应力云图。

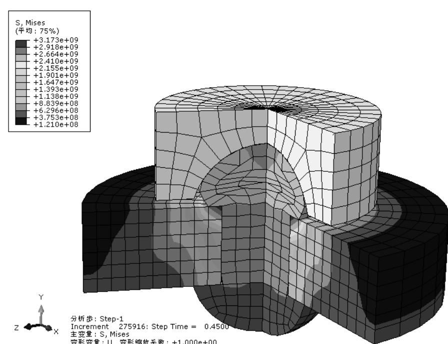


图 16-155　应力云图，INC=180

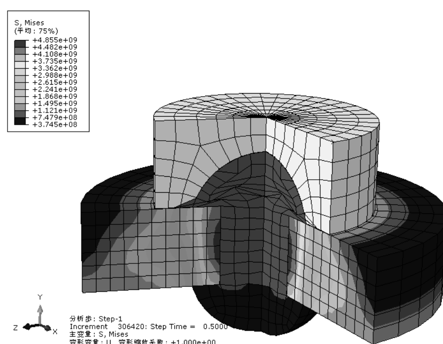


图 16-156　应力云图，INC=200

在 主 LE Max. In-Plane 工具中，将变量改为“LE”（对数应变），显示对数应变云图。图 16-157 所示为 INC=25 时的对数应变云图。图 16-158 所示为 INC=60 时的对数应变云图。

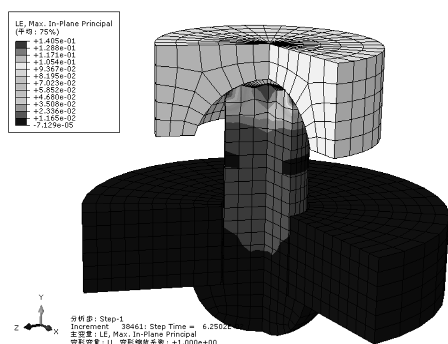


图 16-157　对数应变云图，INC=25

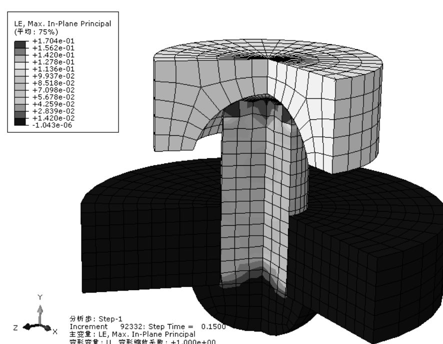


图 16-158　对数应变云图，INC=60

图 16-159 所示为 INC=110 时的对数应变云图。图 16-160 所示为 INC=150 时的对数应变云图。

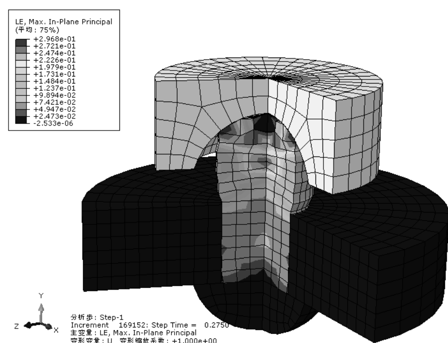


图 16-159　对数应变云图，INC=110

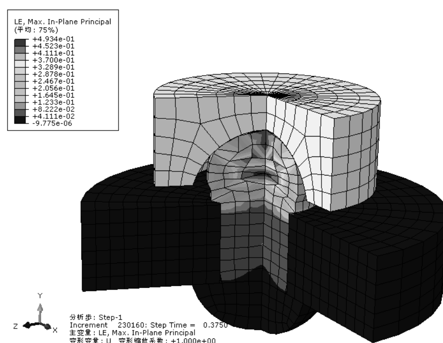


图 16-160　对数应变云图，INC=150

图 16-161 所示为 INC=180 时的对数应变云图。图 16-162 所示为 INC=200 时的对数应变云图。

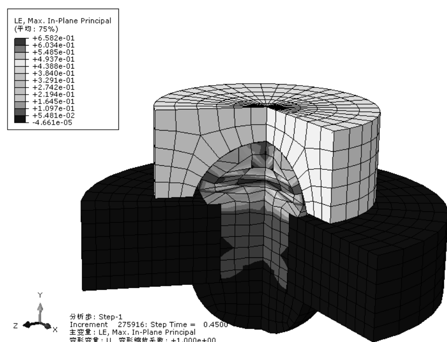


图 16-161　对数应变云图，INC=180

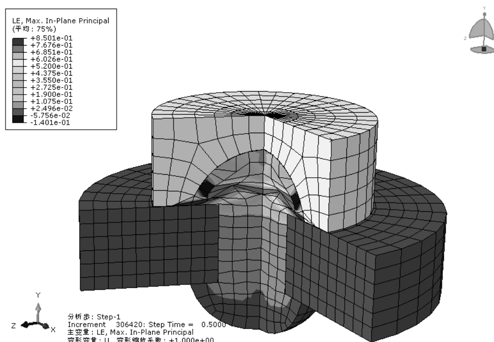


图 16-162　对数应变云图，INC=200

在 主 PE Max. In-Plane 工具中，将变量改为“PE”（塑性应变），显示塑性应变云图。图 16-163 所示为 INC=25 时的塑性应变云图。图 16-164 所示为 INC=60 时的塑性应变云图。

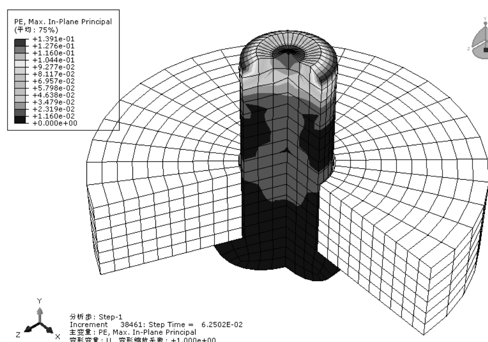


图 16-163　塑性应变云图，INC=25

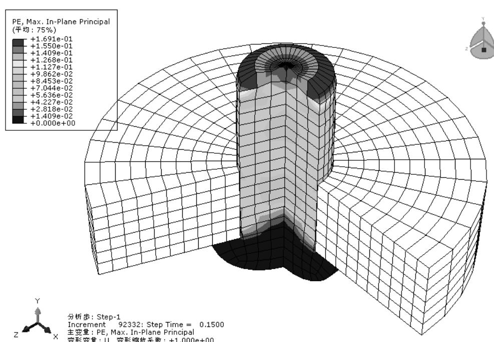


图 16-164　塑性应变云图，INC=60

图 16-165 所示为 INC=110 时的塑性应变云图。图 16-166 所示为 INC=150 时的塑性应变云图。

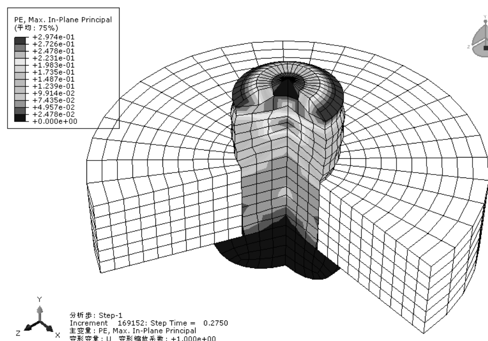


图 16-165　塑性应变云图，INC=110

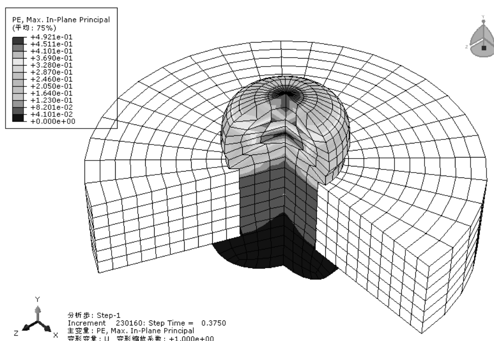


图 16-166　塑性应变云图，INC=150

图 16-167 所示为 INC=180 时的塑性应变云图。图 16-168 所示为 INC=200 时的塑性应变云图。

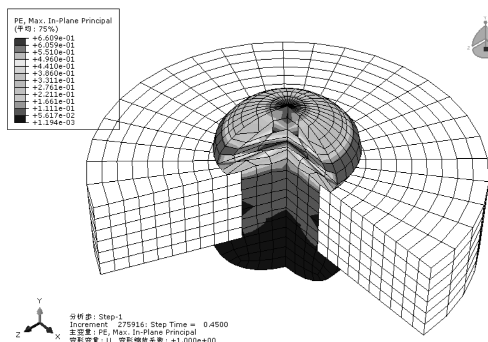


图 16-167 塑性应变云图，INC=180

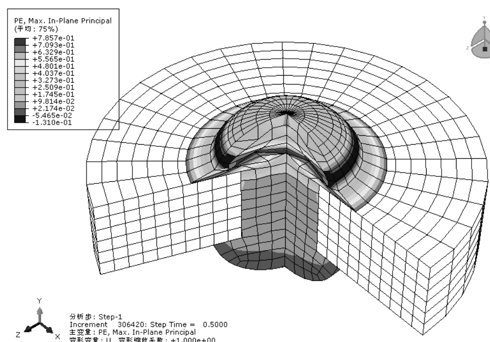


图 16-168 塑性应变云图，INC=200

单击▦按钮，弹出图 16-169 所示的“历程输出”对话框。选择其中的变量，可以绘制相应的曲线。



图 16-169 “历程输出”对话框

图 16-170 所示为 ALLWK（对外做功）曲线，图 16-171 所示为 ALLAE（伪应变能）曲线。

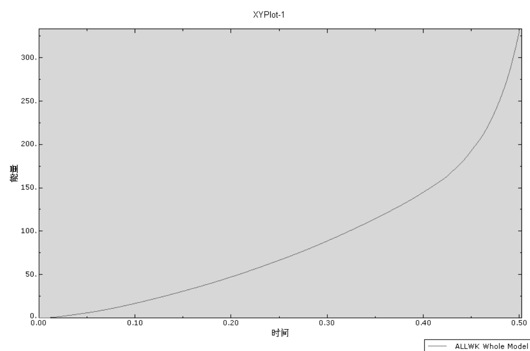


图 16-170 ALLWK（对外做功）曲线

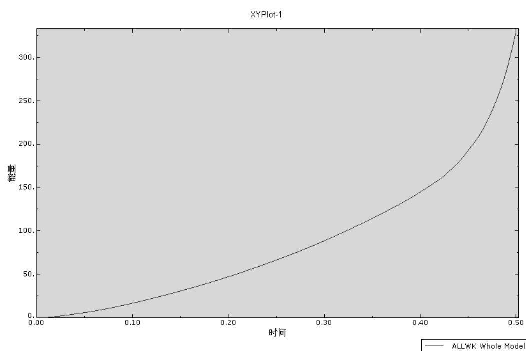


图 16-171 ALLAE（伪应变能）曲线

图 16-172 所示为 ALLFD（摩擦耗散）曲线，图 16-173 所示为 ALLIE（内能）曲线。

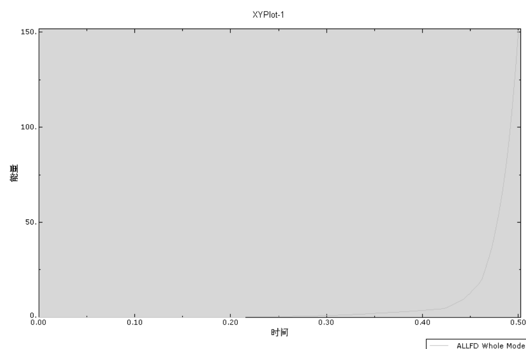


图 16-172　ALLFD（摩擦耗散）曲线

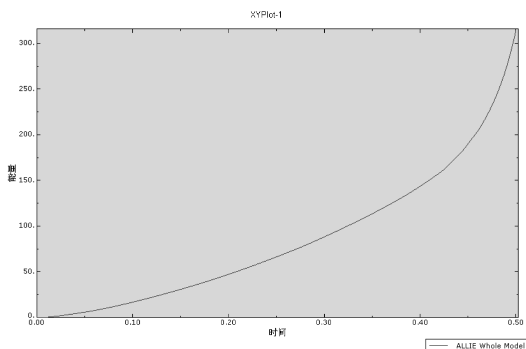


图 16-173　ALLIE（内能）曲线

图 16-174 所示为 ALLKE（动能）曲线，图 16-175 所示为 ALLSE（应变能）曲线。

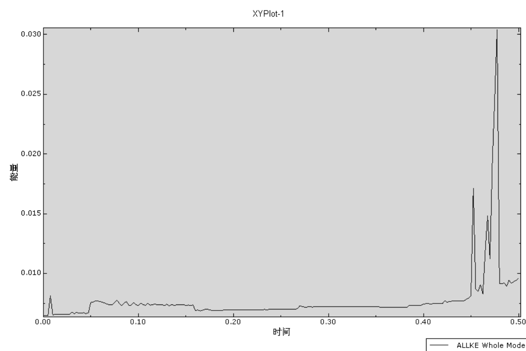


图 16-174　ALLKE（动能）曲线

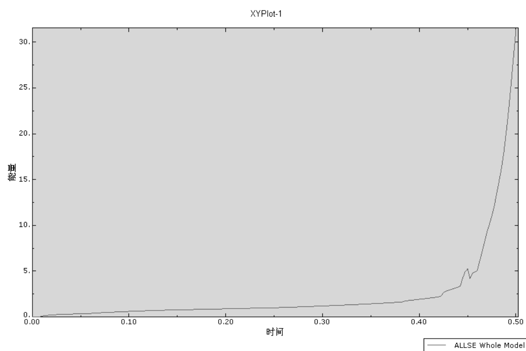


图 16-175　ALLSE（应变能）曲线

图 16-176 所示为 ALLPD（塑性耗散）曲线，图 16-177 所示为 ETOTAL（总能量）曲线。

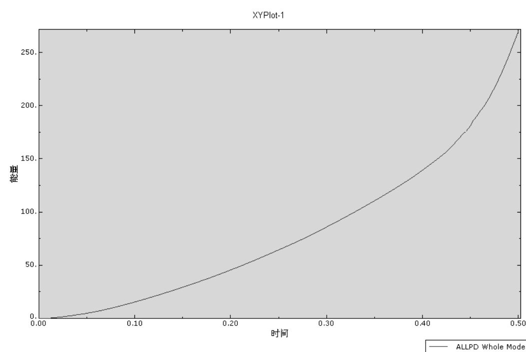


图 16-176　ALLPD（塑性耗散）曲线

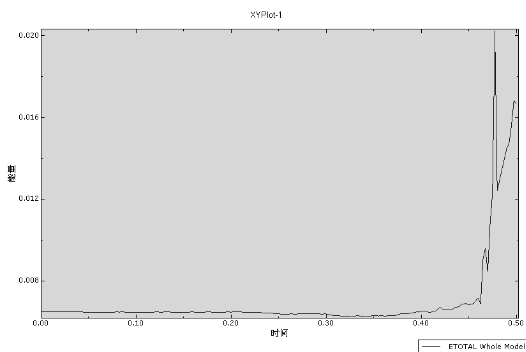


图 16-177　ETOTAL（总能量）曲线

16.3　本章小结

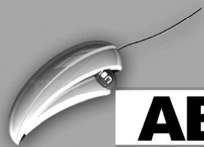
本章结合实例，讲解了进行机械加工仿真的方法。使用有限元方法进行仿真的基本思

想，在任何分析工具中都是适用的。读者读完本书大可不必拘泥于使用哪一种程序进行仿真，理解有限元的基本理论与分析思想才是最为基础与关键的。

本章讲述的实例只为读者介绍基本的方法，其计算结果的可用性不强求。读者可以通过调整质量放大系数进行研究，可以发现质量放大系数变大时，结果的质量发生明显改变。读者在实际使用时应参考可用的计算机性能与所要求的结果的精度进行合理平衡，以达到预期的效果。



在实际应用中，当质量放大系数较大时会出现结果失真的情况，此时一方面可以调整质量放大系数，另一方面可以考虑使用自适应网格技术。这取决于读者在实际工程中所遇到的问题的复杂性、精度要求以及所使用的计算机性能。



参 考 文 献

[1] 贾志宁，齐效文，郝彩哲. 机车车辆弹塑性接触应力场动力学仿真[J]. 电力机车与城轨车辆. 2006(02)：21-23.

[2] 王天义，曹建芳，饶建华. 轧辊材料及其热处理工艺发展的现状与趋势[J]. 南方金属. 2005(01) ：4-6.

[3] 刘志兵，王西彬，解丽静. 难加工材料的高速切削与加工实例[J]. 新技术新工艺. 2006(01) ：46-48.

[4] 杨勇，柯映林，董辉跃. 金属切削加工中航空铝合金板材的本构模型[J]. 中国有色金属学报. 2005(06) ：854-859.

[5] 王洪祥，汤敬计，廖世宾，等. 超精密切削切屑形成过程的三维有限元仿真[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2005(03) ：292-295.

[6] 黄志刚，柯映林，王立涛. 金属切削加工的热力耦合模型及有限元模拟研究[J]. 航空学报. 2004，25(03) ：317-320.

[7] 方刚，曾攀. 金属正交切削工艺的有限元模拟[J]. 机械科学与技术. 2003，22(04) ：641-645.

[8] 石亦平，周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[9] 曾洪江，黄聪. CATIA V5 机械设计从入门到精通——进阶篇[M]. 北京：中国青年出版社，2004.

[10] 赵腾伦，ABAQUS 6.6 在机械工程中的应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2007.

[11] 孙大乐，赵建国. 宽带钢轧机支承辊辊形优化设计[J]. 钢铁. 2011，46(04) ：40-43.

[12] 付志云. 支承辊边部缺陷分析与控制技术[J]. 大型铸锻件. 2011(02) ：12-14.

[13] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[14] 张智勇，秦旭，宋榜君. 热轧板带支承辊的使用与管理[J]. 一重技术. 2010(06) ：64-67.

[15] 段雄，李大云. 铸轧辊套的热结构耦合分析及疲劳寿命预测研究[J]. 机械设计与制造. 2009(01) ：137-139.

[16] 于斌，岳晓丽，佘广夫，等. 热连轧机支承辊辊型的多目标优化设计及应用[J]. 钢铁. 2008，43(05) ：51-54.

[17] 贾焕美，耿磊. 热轧 1750mm 带钢轧机轧辊失效浅析[J]. 天津冶金. 2008(02) ：41-43.

[18] 田勇，胡贤磊，王昭东，等. 2500mm 中厚板精轧机支承辊辊型优化设计[J]. 钢铁研究学报. 2006(10) ：23-25.

[19] 常安，白金兰，邸洪双，等. 首钢 3500 mm 中板轧机辊型研究与应用[J]. 钢铁. 2006(08) ：41-45.

[20] 孙东升. 不锈钢材料的车削加工[J]. 科技情报开发与经济. 2002(05) ：180-181.

[21] 朱国民. 不锈钢和高温合金钢的切削加工性探讨[J]. 煤矿机械. 2001(09) ：48.

[22] 刘有荣，刘家浚，朱宝亮. Si3N4 基陶瓷刀具的摩擦磨损规律与机理分析[J]. 摩擦学学报. 1997(02) ：105-114.

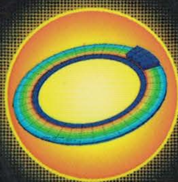
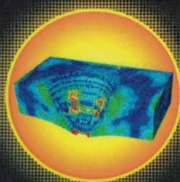
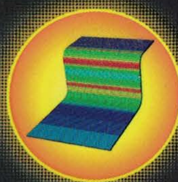
[23] 董丽华，任洪斌，李振加. 奥氏体不锈钢切削加工刀片选材的试验研究[J]. 机械工程师. 1997(02) ：7-8.

[24] 初犁. 不锈钢的切削加工[J]. 工具技术. 1993(10) ：22-26.

[25] 马晓峰. ABAQUS 6.11 中文版有限元分析从入门到精通[M]. 北京：清华大学出版社，2013.

[26] 张建华，丁磊. ABAQUS 基础入门与案例精通[M]. 北京：电子工业出版社，2012.

在线互动交流平台
官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
官方博客：http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj
读者信箱：cmp_itbook@163.com


本书导读

本书以ABAQUS 6.12版为软件平台，介绍了ABAQUS的操作命令及其在工程结构数值分析中的使用方法和技巧。

本书分基础应用篇和实际工程篇两个层次讲解，共16章。基础应用篇（第1～9章）包括有限单元法的基础理论、ABAQUS入门知识介绍，几何建模技术与技巧、分析步的概念与设置方法、相互作用的概念与使用、载荷与边界条件的定义、网格的划分、作业的创建与设置以及可视化后处理技术；实际工程篇（第10～16章）依托工程中常见的实例，按照不同的分析方式，分层次、分类别地进行了详尽的操作演示与方法教学。本书根据实际应用为读者提供的专题包括结构静力学分析、显式与隐式的动力学分析、线性与非线性的静力与动力学分析、接触分析、热结构耦合问题分析、加工过程仿真等，具有一定的参考价值。

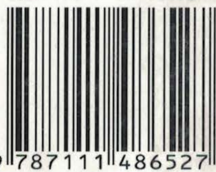
本书工程背景深厚，内容丰富，讲解详尽，内容安排由浅入深，适用于不同层次的ABAQUS用户，既可作为大、中专院校相关专业高年级本科生、研究生的参考用书，也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信服务号


计算机分社微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-48652-7
策划编辑◎张淑谦 / 封面设计◎

定价：86.00元（含1DVD）